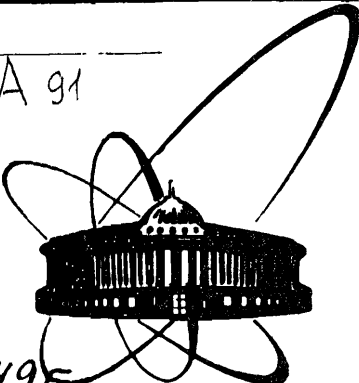


А 91



СЗ49

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

P16-87-310

А.А.Астапов, М.М.Комочков

**РАДИОАКТИВНОСТЬ,  
НАВЕДЕННАЯ ПРОТОНАМИ  
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

Направлено в журнал "Атомная энергия"

**1987**

Ремонт, наладка и обслуживание ускорителей частиц высоких энергий и, в частности, ускорителей протонов сопряжены с облучением персонала в основном гамма-излучением наведенной радиоактивности. Уровни гамма-излучения достаточно велики, так что вклад его в полную дозу персонала, как правило, превышает 60%<sup>/1-4/</sup>.

Одним из основных источников информации для прогнозирования радиационной обстановки, которая определяется наведенной радиоактивностью, и выбора конструкционного материала с наименьшим выходом радиоактивности являются данные<sup>/5/</sup>, полученные с помощью полуэмпирических аппроксимаций<sup>/6/</sup> сечений образования радионуклидов в протон-ядерных взаимодействиях.

Более поздние аппроксимации<sup>/7/</sup> со значительно большей точностью описывают сечения образования легких ядер-продуктов, например  ${}^7\text{Be}$ , для которого аппроксимации<sup>/6/</sup> могут давать отличия от экспериментальных значений в несколько десятков раз. С помощью аппроксимаций<sup>/7/</sup> можно также учитывать и продукты периферических реакций, которые при определенных обстоятельствах дают существенный вклад в дозу от наведенной радиоактивности. Кроме того, аппроксимации<sup>/7/</sup> для ядер-мишеней с порядковым номером  $Z \leq 20$  являются самыми точными: стандартное отклонение вычисленных сечений расщепления относительно экспериментальных не превышает 30%<sup>/7/</sup>.

Цель настоящей работы - получить расчетные данные о выходе наведенной радиоактивности на основе работ<sup>/7/</sup> для сравнительно легких материалов, в случае которых ожидалось наибольшее отличие от результатов<sup>/5/</sup>, полученных на основе<sup>/6/</sup>.

Временные зависимости мощности поглощенной дозы  $\gamma$ -излучения на единичный поток падающих протонов от  $i$ -го радионуклида, образовавшегося в единице массы облученного вещества, на единичном расстоянии от точечного изотропного источника получены следующим образом:

$$P_i(t) = \Gamma_i N_A \sum_j \frac{d_j \sigma_{ij}}{A_j} (1 - e^{-\lambda_i T}) e^{-\lambda_i t}$$

где  $\Gamma_i$  - гамма - постоянная  $i$ -го радионуклида;

$N_A$  - число Авогадро;

$d_j$  - весовая доля  $j$ -го элемента исследуемого материала;

$A_j$  - атомный вес  $j$ -го элемента;

$\sigma_{ij}$  - сечение образования  $i$ -го радионуклида при взаимодействии первичного протона с ядром  $j$ -го элемента;

$\lambda_i$  - постоянная  $\gamma$ -распада  $i$ -го радионуклида.

Необходимые для сравнения экспериментальные данные<sup>/8/</sup> получены облучением в течение 1 ч протонами с энергией 12 ГэВ различных составляющих бетона.

На рис. 1 и 2 представлены рассчитанные с использованием аппроксимаций<sup>/6,7/</sup> и экспериментальные<sup>/8/</sup> значения  $P_i(t)$ , а также экспериментальные зависимости  $P(t) = \sum_i P_i(t)$  для мрамора и цемента. Полученные результаты для радионуклидов  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{22}\text{Na}$  и  ${}^{24}\text{Na}$  показывают, что аппроксимации<sup>/6/</sup> дают отличие примерно в 2-3 раза, а<sup>/7/</sup> - не более 50%. Приблизительно с такой же точностью будет определяться мощность дозы от всех образовавшихся радионуклидов, т.к. указанные радионуклиды дают основной вклад в поле излучения от наведенной радиоактивности (см.рис.3).

Из результатов расчета мощности дозы от графита (рис.4) следует, что использование аппроксимаций<sup>/6/</sup> приводит к занижению примерно в 3 раза для долгоживущей компоненты, определяемой  ${}^7\text{Be}$ . Короткоживущая же компонента, обусловленная  ${}^{11}\text{C}$ , совсем не рассчитывается. Аппроксимации<sup>/7/</sup> позволяют получать сечения образования  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^{11}\text{C}$  при бомбардировке графита протонами, практически совпадающие с экспериментальными.

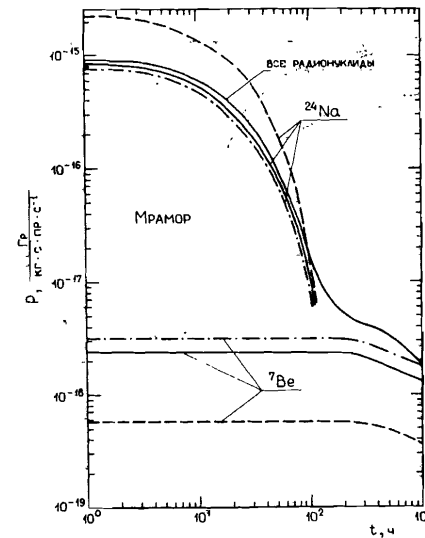


Рис. 1

Временные зависимости мощности поглощенной дозы  $P_i(t)$  для  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{24}\text{Na}$  и  $P(t)$  для всех радионуклидов, образовавшихся в мраморе после облучения в течение 1ч протонами с энергией 12 ГэВ  
(— эксперимент<sup>/8/</sup>; расчет: --- по<sup>/6/</sup>, -.-.- по<sup>/7/</sup>).

Корректное определение выхода наведенной радиоактивности в среде, протяженность которой превышает длину свободного пробега первичного протона до неупругого взаимодействия, требует учета образующихся радионуклидов в реакциях вторичных частиц.

Моделирование методом Монте-Карло процесса наработки активности в толстой медной мишени при бомбардировке её протонами с энергией 3,65 ГэВ показало, что вторичные частицы с энергией  $\leq 300$  МэВ определяют не менее 50% радиоактивности<sup>/9/</sup>. Причем их вклад с увеличением толщины мишени возрастает.

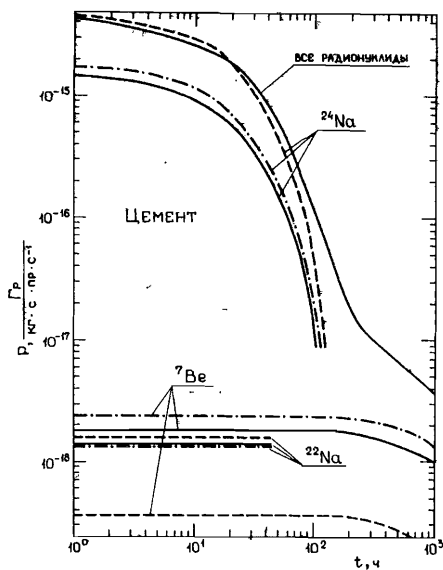


Рис. 2

Временные зависимости мощности поглощенной дозы  $P_i(t)$  для  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{22}\text{Na}$ ,  ${}^{24}\text{Na}$  и  $P(t)$  для всех радионуклидов, образовавшихся в цементе после облучения в течение 1 ч протонами с энергией 12 ГэВ (— эксперимент<sup>/8/</sup>; расчет: --- по<sup>/6/</sup>, -.-.- по<sup>/7/</sup>).

Образование радиоактивных изотопов меди в периферических реакциях вторичных нейтронов с ядрами естественной меди происходит с сечениями, значительно большими, чем в этих же реакциях первичных протонов. Относительно высокая скорость распадов этих радионуклидов приводит к тому, что в начальный момент после облучения наведенная радиоактивность медной мишени определяется вторичными частицами практически на 90%.

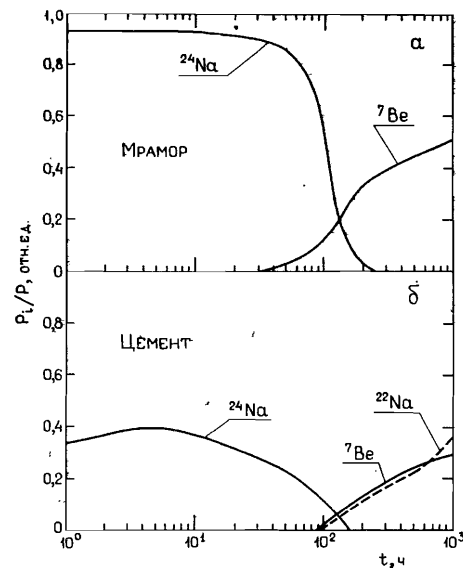


Рис. 3

Временные зависимости относительных вкладов  $P_i/P$  радионуклидов  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{22}\text{Na}$  и  ${}^{24}\text{Na}$  в мощность поглощенной дозы мрамора (а) и цемента (б), облученных протонами с энергией 12 ГэВ в течение 1 ч.

Учитывая важнейшую роль и состояние методов оценок радиоактивности, наведенной протонами высоких энергий, необходимо получение более удобных для практического использования ядерно-физических констант на основе полумпирических аппроксимаций<sup>/7/</sup> сечений образования радионуклидов в протон-ядерных взаимодействиях. Применение таких данных позволит значительно повысить безопасность работы на высокоэнергетических протонных ускорителях.

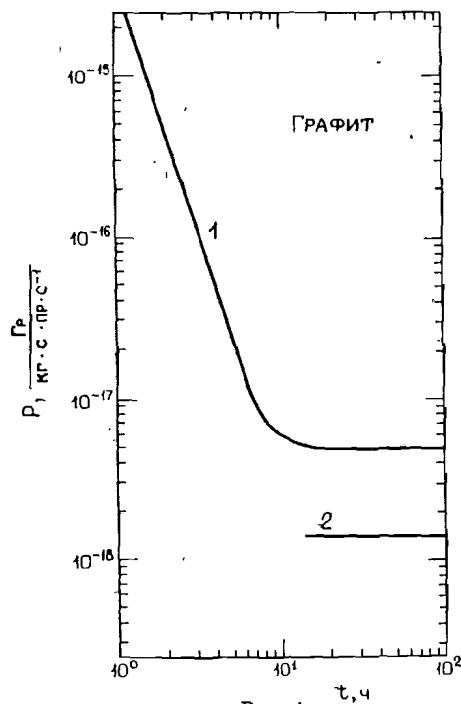


Рис.4

Расчетные временные зависимости мощности поглощенной дозы для графита, облученного протонами с энергией 12 ГэВ в течение 1 ч (1 - по /7/, 2 - по /6/).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев Л.Н., Комочков М.М., Сичев Б.С. Основы защиты ускорителей: М.: Атомиздат, 1971.
2. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Р16-80-601, Дубна, 1980.
3. Комочков М.М., Лебедев В.Н. Практическое руководство по радиационной безопасности на ускорителях заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1986.

4. Yamaguchi C. et al. CERN, Rep. No. HS-RP/058, 1981.
5. Barbier M. Induced Radioactivity.-North-Holland publishing Co., Amsterdam, New York, 1969.
6. Rudstam G.Z. Naturforschung, 21a, 1027, 1966.
7. Silberberg R., Tsao C.H. Astrophys. J., Supl. Series, 220, 25, 315, 1973.
8. Kondo K. et al. Health Phys., 46, 1221, 1984.
9. Астапов А.А., Бамблевский В.П. ОИЯИ, Р16-85-435, Дубна, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел  
5 мая 1987 года.

### НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
Д11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
Д10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р. 80 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р. 50 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Астапов А.А., Комочков М.М.  
Радиоактивность, наведенная протонами  
высоких энергий

P16-87-310

Представлены результаты расчета мощности дозы гамма-излучения наведенной радиоактивности, полученные на основе современной аппроксимации сечений образования радионуклидов в протон-ядерных взаимодействиях. Согласие с экспериментальными данными может быть не хуже 50%, что в 4-6 раз улучшает точность расчета, основанного на аппроксимации Рудстама для легких ядер.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Astapov A.A., Komochkov M.M.  
Radioactivity Induced by High Energy  
Protons

P16-87-310

Calculation results on the induced radioactivity gamma-radiation dose power obtained by the complete approximation of radionuclide production cross sections in proton-nucleus interactions are presented. Agreement with the experimental data may be not worse than 50%. That is by a factor of 4-6 better than the accuracy of the calculation based on Rudstam's approximation for light nuclei.

The investigation has been performed at the Department of Radiation Safety and Radiation Researches, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987