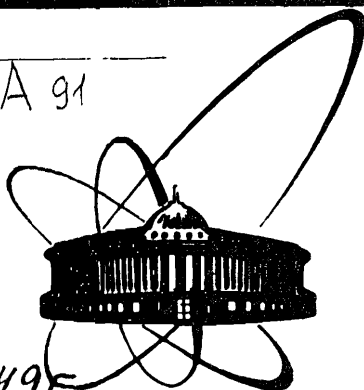


A 91



**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 единицу потока 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.

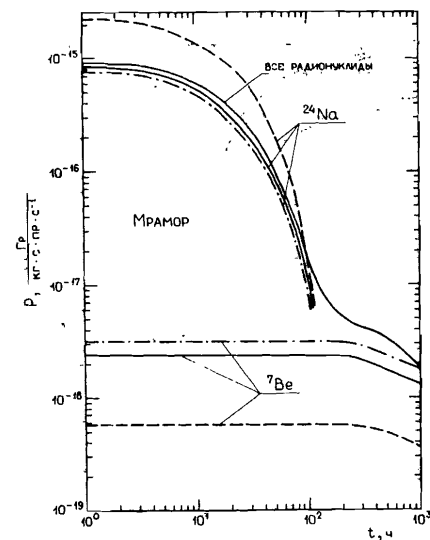


Рис. 1

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 1 ч 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.

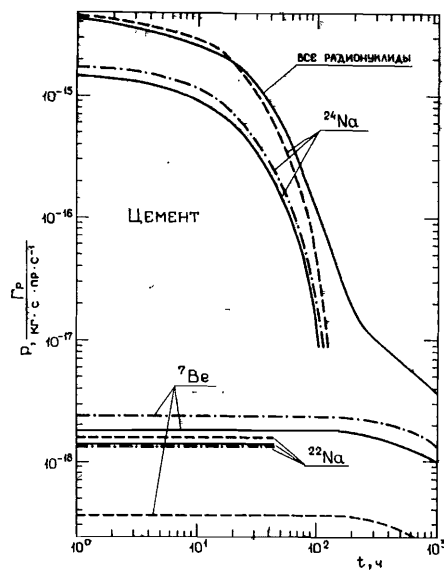


Рис. 2

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%.

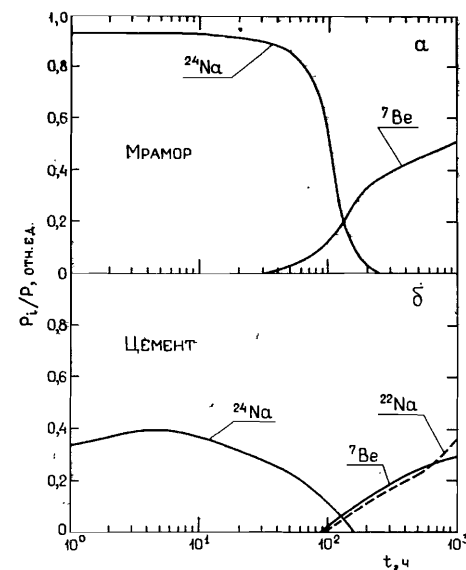


Рис. 3

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 полуэмпирических аппроксимаций<sup>/7/</sup> сечений образования радионуклидов в протон-ядерных взаимодействиях. Применение таких данных позволит значительно повысить безопасность работы на высокоэнергетических протонных ускорителях.

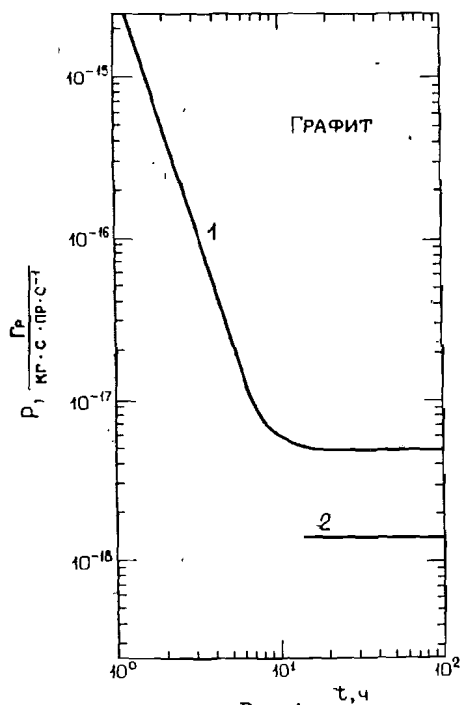


Рис. 4

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.