

Рис. 4. Зависимость потока быстрых нейтронов от  $R$  для различных  $z$ , см:  
1 — 35; 2 — 55; 3 — 80; 4 — 105.

нов от радиуса источника для разных глубин приведена на рис. 4. Видно, что при увеличении  $z$  размеры источника, который может быть принят за бесконечный, уменьшаются.

Интересно оценить вклад промежуточных нейтронов в полный поток. Детектор регистрировал преимущественно нейтроны в диапазоне  $1 \text{ эв} < E_n < 1,5 \text{ Мэв}$ . По известной зависимости эффективности детектора от энергии [8], а также на основании известных величин потоков быстрых нейтронов и ожидаемого вида спектра было определено распределение потока промежуточных нейтронов ( $1 \text{ эв} \leq E_n \leq 0,5 \text{ Мэв}$ ) по глубине канала (рис. 5). Наблюдается обеднение потока нейтронами промежуточных энергий при удалении детектора вдоль канала. Поток промежуточных нейтронов уменьшается в зависимости от  $z$  по закону  $1/z^3$ , начиная с  $z = 45 \text{ см}$ .

В заключение авторы выражают глубокую благодарность О. И. Лейпунскому за ценные советы и обсуждение результатов работы.

Поступило в Редакцию 15/VII 1964 г.

## Зависимость выхода реакции $(\alpha, n)$ от энергии $\alpha$ -частиц

Э. М. Центер, А. Б. Силин

Выход нейтронов в результате  $(\alpha, n)$ -реакции представляет интерес для многих практических задач, в частности для ряда задач контроля [1—4]. При решении некоторых вопросов геохимии и геофизики необходимы данные о выходе реакции  $(\alpha, n)$  на различных элементах [6—10].

В работе [11] приведена эмпирическая формула

$$n = 0,152E^{3,56}. \quad (1)$$

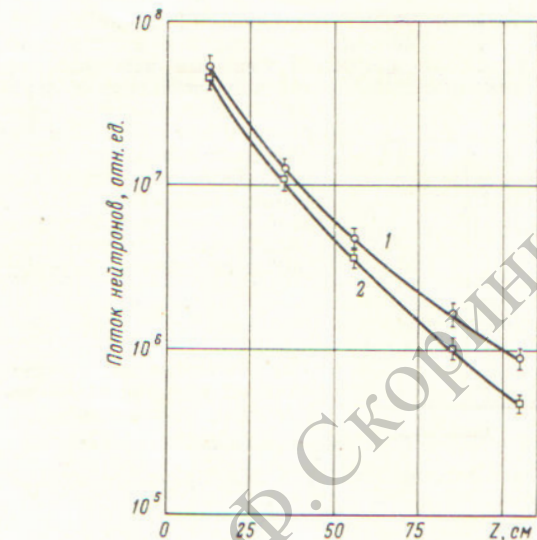


Рис. 5. Зависимость потока быстрых (1) и промежуточных (2) нейтронов от  $z$  для  $R = \infty$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. A. Simon, C. Clifford. Nucl. Sci. and Engng. 1, 103 (1956).
2. Защита ядерных реакторов. Под ред. Т. Роквелла. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
3. Reactor Handbook, V. III, Part B, Shielding. Ed. E. Blizard. ORNL. N. Y.— London, 1962.
4. R. Schamberger, E. Shore, H. Sleeper. The transmission of neutrons and gamma-rays through hair slots. US AEC, Report BNL-2019 — BNL-2028 (1954).
5. F. Shore, R. Schamberger. The transmission of neutron through ducts in Water. US AEC, Report BNL-390, 1956.
6. Г. Г. Дорошенко и др. В сб. «Вопросы дозиметрии и защиты от излучений». Вып. 2. М., Госатомиздат, 1963, стр. 179.
7. В. Г. Золотухин и др. Там же, стр. 146.
8. S. Basson. Neutron Dosimetry. V. II. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1963, p. 241.

УДК 539.172.16

для зависимости выхода нейтронов на бериллии от энергии  $\alpha$ -частиц.

Формула (1) выведена по трем значениям энергии  $\alpha$ -частиц:

$$E_{\alpha} = 5,14 \text{ Мэв (Pu}^{239}\text{);}$$

$$E_{\alpha} = 5,48 \text{ Мэв (Am}^{241}\text{);}$$

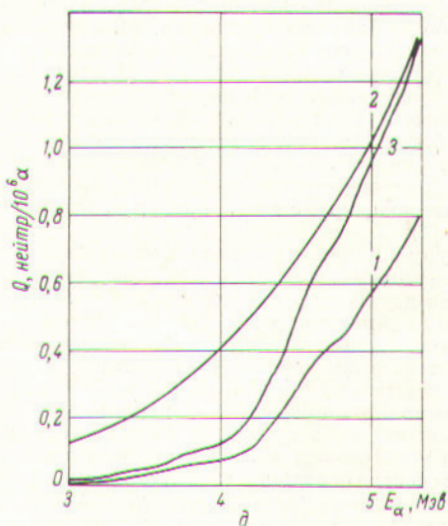
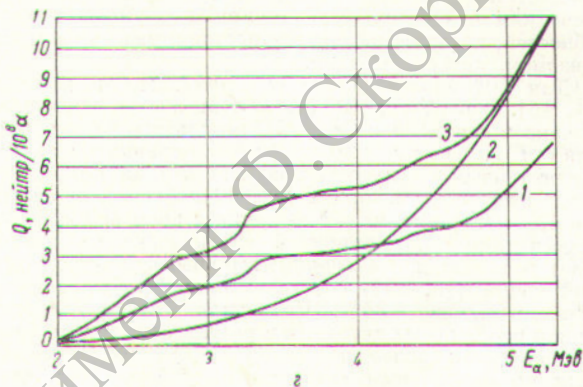
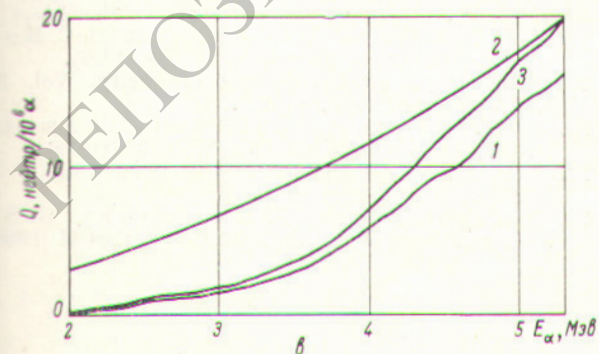
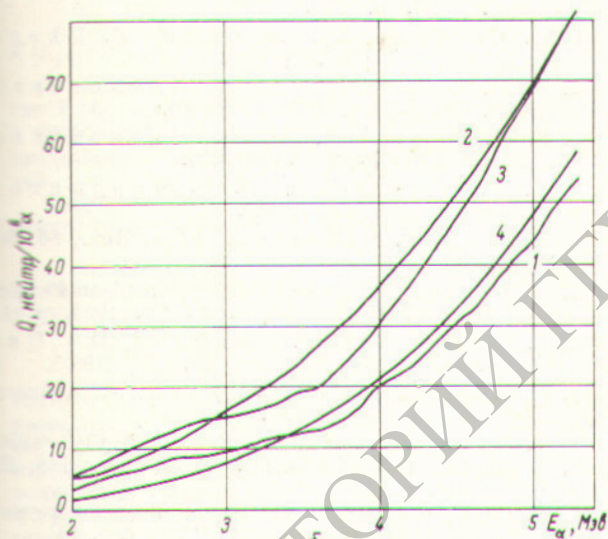
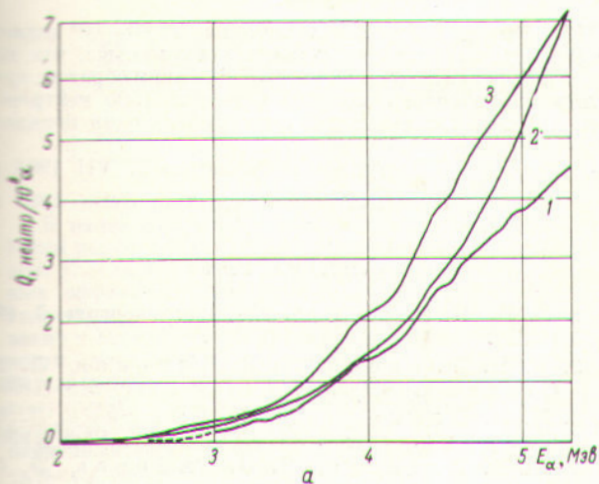
$$E_{\alpha} = 6,11 \text{ Мэв (Cm}^{242}\text{).}$$

Аналогичные эмпирические формулы типа

$$Q = kE^n \quad (2)$$

приведены для ряда веществ в работах [12, 13]. Для определения параметров  $k$  и  $n$  авторы этих работ использовали значения  $Q$ , полученные ими с излучателями  $Po^{210}$  ( $E_\alpha = 5,3$  Мэв),  $RaC'$  ( $E_\alpha = 7,68$  Мэв) и  $Rn + RaA + RaC'$  ( $E_\alpha$  соответственно равно 5,5; 6 и 7,68 Мэв).

Эти формулы без специальной проверки нельзя использовать при энергиях  $\alpha$ -частиц, выходящих за



Зависимость выхода нейтронов от энергии  $\alpha$ -частиц для кислорода (а), бериллия (б), бора (в), углерода (г), магния (д).

пределы приведенного выше диапазона. Необходимость такой проверки подтверждается еще тем, что указанным формулам соответствуют кривые с монотонно растущими первыми производными по энергии. В общем случае такой монотонности не должно быть из-за резонансных пиков в кривой зависимости сечения реакции от энергии  $\alpha$ -частиц.

Для Be, B, C, Mg и O в литературе имеются кривые зависимости сечения реакции ( $\alpha, n$ ) от энергии до значений  $5,3 \text{ Мэв}$  [14, 15]. По этим сечениям можно рассчитать зависимость выхода нейтронов от энергии  $\alpha$ -частиц. Данные, необходимые для расчета потери энергии  $\alpha$ -частицы на единице пути, были получены пересчетом потерь энергии в воздухе [16] по известным значениям относительных атомарных тормозных способностей, которые мы считаем постоянными в рассматриваемом интервале энергий.

Для  $O^{18}$  зависимость  $\sigma(E)$  приведена в работах [14, 15]. Учитывая, что ( $\alpha, n$ )-реакция на кислороде связана в основном с  $O^{18}$  [17], результаты такого расчета (см. рисунок а, кривая 1) можно сравнить с экспериментальными данными, полученными на природной смеси изотопов кислорода [18, 19]. Расчетное значение  $4,5$  нейтронов на  $10^6 \alpha$ -частиц с энергией  $5,3 \text{ Мэв}$  (пересчитано для природной смеси изотопов кислорода) расходится с экспериментальным значением для этой точки [18, 19], составляющим  $7$  нейтронов на  $10^6 \alpha$ -частиц, на  $\sim 35\%$ . Последняя величина, полученная различными авторами в результате прямых опытов, является более достоверной, чем рассчитанная нами по поперечным сечениям из работы [15], точность которых не лучше  $25\%$ . Очевидно, что кривая 1 должна правильно отражать характер зависимости выхода нейтронов от энергии  $\alpha$ -частиц, и мы получим кривую, более близкую к истинной, если кривую 1 нормируем к экспериментальному значению в точке  $5,3 \text{ Мэв}$  (кривая 3 на рисунке, а). Приведена также кривая 2, полученная по формуле (2). Были также проведены расчеты для Be, B, C и Mg по сечениям, указанным в работах [14, 15], и построены аналогичные графики (см. рисунок, б, в, г, д), обозначенные, как и на рисунке а, соответственно цифрами 1, 2, 3. На рисунке б приведена, кроме того, кривая 4, построенная по формуле (1).

Формулу (2) для кислорода можно было бы сопоставить с данными, приведенными в работе [20]. Автор сообщает о двух новых источниках нейтронов, разработанных С. Амиелем и А. Ниром. Одним из таких источников является  $Ro^{210}-O^{18}$  (выход нейтронов составляет  $30$  нейтронов на  $10^6 \alpha$ -частиц, средняя энергия приблизительно  $2,4 \text{ Мэв}$ ). В работе [17] для выхода нейтронов из источника  $Ro^{210}-O^{18}$  приведена величина  $31$  нейтрон на  $10^6 \alpha$ -частиц. В 1959 г. опубликованы данные о  $\gamma$ -излучении нейтронного источника  $Ro^{210}-O^{18}$  [21] и спектре нейтронов такого источника [22]. Максимум кривой приходится на энергию  $2,4 \text{ Мэв}$ . В сообщении [20] сомнительными являются данные о выходе нейтронов из источника  $Th^{228}-O^{18}$  ( $1500$  нейтронов на  $10^6 \alpha$ -частиц). Энергии  $\alpha$ -частиц  $Th^{228}$  и продуктов его распада равны  $5,4; 5,7; 6,3; 6,8; 6,08$  и  $8,8 \text{ Мэв}$  [23], причем на долю последней группы приходится примерно  $13\%$ . Для  $\alpha$ -частиц  $RaC$  ( $E = 7,68 \text{ Мэв}$ ) выход в пересчете на  $O^{18}$  составляет  $280$  нейтронов на  $10^6 \alpha$ -частиц

[12]. Выход нейтронов источника  $Th^{228}-O^{18}$  должен быть, судя по спектру  $\alpha$ -частиц, еще меньше, чем выход нейтронов источника  $RaC'-O^{18}$ . Таким образом, приведенная в сообщении [20] величина  $1500$  нейтронов на  $10^6 \alpha$ -частиц завышена примерно на один порядок.

Поступило в Редакцию 27/VII 1964 г.

В окончательной редакции 6/I— 1965 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Иванов и др. «Атомная энергия», 7, 166 (1959).
2. И. Н. Плаксин, В. Н. Смирнов, Л. П. Старчик. «Докл. АН СССР», 127, 618 (1959).
3. И. Н. Плаксин, В. Н. Смирнов, Л. П. Старчик. «Докл. АН СССР», 128, 1208 (1959).
4. И. Н. Плаксин, В. Н. Смирнов, Л. П. Старчик. «Атомная энергия», 9, 361 (1960).
5. A. Blanc et al. Proceedings of the second International conference on the Peaceful Uses of atomic energy. V.23, p. 269. (1958).
6. D. Cartwright, M. Todd, B. Ukaea. Nucl. Power, 6, 66, 79 (1961).
7. Г. В. Горшков, Н. М. Лятковская. «Докл. АН СССР», 133, 92 (1960).
8. Г. В. Горшков, Н. М. Лятковская. «Докл. АН СССР», 25, 745 (1939).
9. П. Л. Кашкаров, В. В. Чердынцев. «Геохимия», № 7, 632 (1958).
10. I. Pine, P. Morrison. Phys. Rev., 86, 606 (1952).
11. I. Marion, I. Fowler. Fast neutron Physics. Interscience Publishers, Inc. N. Y., 1960, p. 12.
12. Г. В. Горшков, В. А. Зябкин, О. С. Цветков. «Атомная энергия», 13, 475 (1962).
13. Г. В. Горшков, О. С. Цветков. «Атомная энергия», 14, 550 (1963).
14. T. Banner et al. Phys. Rev., 102, 1348 (1956).
15. J. Boir, H. Willard. Phys. Rev., 128, 299 (1962).
16. Э. Сегре. Экспериментальная ядерная физика. Т. 1. М., Изд-во иностр. лит., 1955, стр. 154.
17. И. А. Сердюкова, А. Г. Хабахпашев, Э. М. Центер. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 21, 1017 (1957).
18. Э. Сегре. Экспериментальная ядерная физика. Т. II. М., Изд-во иностр. лит., 1955, стр. 311.
19. Г. В. Горшков, В. А. Зябкин, О. С. Цветков. «Атомная энергия», 13, 65 (1962).
20. G. Ven-David. Neutron dosimetry. Vol. II. IAEA, Vienna, 1963, p. 407.
21. Э. М. Центер, А. Г. Хабахпашев, И. А. Пыркин. ЖЭТФ, 37, 1138 (1959).
22. А. Г. Хабахпашев. «Атомная энергия», 7, 71 (1959).
23. D. Strominger, J. Hollander, G. Seaborg. Rev. Mod. Phys., 30, No. 2, Part II (1958).