

что $(p_{i0}, p_{j0}) = 0$, и пренебрегая членами с α^2 , получим

$$\delta = \sum_{i \neq j}^m (p_i, p_j) = -2\bar{\alpha} \sum_{i=1}^m (m-i) \bar{p}_i^2.$$

Пренебрегая изменением температуры остаточного ядра, в поправке можно считать $\bar{p}_i^2 = p_j^2$, где $i, j = 1, 2, \dots, m$. Тогда

$$\delta = -2\bar{\alpha} \sum_{i=1}^m (m-i) \bar{p}_i^2 = -\bar{\alpha} (m-1) \sum_{i=1}^m \bar{p}_i^2$$

$$\text{и} \quad \bar{p}_0^2 = [1 - \bar{\alpha} (m-1)] \sum_{i=1}^m \bar{p}_i^2. \quad (4)$$

Впервые формула (4) для $m = 3$ была использована в работах [3, 4]. При $\bar{\alpha} = 0$ формула (4) переходит

в соотношение (1). Однако при $\bar{\alpha} \approx 0,1$ ($A \approx 10$) ошибка, связанная с использованием соотношения (1), может достигать 20–30%.

Поступило в Редакцию 22/IV 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Fung, I. Perlman. Phys. Rev., 87, 723 (1952).
2. Н. И. Борисова, М. Я. Кузнецова, Л. Н. Курчатова, В. Н. Мекедов, Л. В. Чистяков. ЖЭТФ, 37, 366 (1959).
3. F. Denisov, P. Cherenkov. Proc. Conf. Nucl. Phys. Dunod, Paris, 1959, p. 676.
4. В. А. Балицкий, Ф. П. Денисов. В кн. «Труды Второй всесоюзной конференции по ядерным реакциям при малых и средних энергиях». М., Изд-во АН СССР, 1962, стр. 450.

УДК 621.039.538.7

Спектры быстрых нейтронов в тяжелых средах и воде

Д. Л. Бродер, А. С. Жилкин, А. А. Кутузов

Защитные свойства железа, свинца, а также железисто-свинцово-водных композиций изучались ранее как экспериментально, так и теоретически [1–3]. Измерения осуществлялись с помощью пороговых детекторов.

Расчеты для тяжелых сред проводились в P_0 -приближении метода сферических гармоник. В работах [1, 2] были рассчитаны спектры быстрых нейтронов, замедляющихся в железе и свинце. Точность этих расчетов проверялась путем сравнения расчетных и экспериментальных значений активации различных пороговых детекторов. Однако получить спектр нейтронов по результатам измерений пороговыми индикаторами затруднительно.

Представляет также интерес поведение спектра нейтронов вблизи границы раздела тяжелая среда — вода, так как применяемые в настоящее время методы расчета биологической защиты наименее точны именно в приграничных областях вследствие быстрого изменения спектра и угловых распределений нейтронов.

В настоящей работе спектры замедляющихся нейтронов в железе, свинце и воде за слоем железа и свинца от моноэнергетических источников с $E_0 = 3,4$ Мэв и $E_0 = 15$ Мэв измерены сцинтилляционным спектрометром. В качестве спектрометра использовался кристалл стиблена в сочетании с ФЭУ-13 и 100-канальный амплитудный анализатор АИ-100. Дискриминация γ -фона осуществлялась по времени высвечивания [4].

Измерения проводились в призмах из железа и свинца размерами $710 \times 710 \times 600$ мм. При измерениях в воде слой железа и свинца располагался между мишенью ускорителя и баком с водой.

На рис. 1–6 показаны измеренные спектры замедляющихся нейтронов от источников с $E_0 = 3,35$ Мэв и $E_0 = 14,9$ Мэв. Все спектры приведены к одному и тому же значению потока нейтронов в интервале энергий 3,2–3,5 Мэв для источника с $E_0 = 3,3$ Мэв и в интервале 14,45–15,65 Мэв для источника с $E_0 = 14,9$ Мэв. На рис. 1, кроме того, для сравнения при-

веден спектр нейтронов, измеренный в работе [5] с источником $E_0 = 3$ Мэв для барьерной геометрии. Видно, что спектр, измеренный в настоящей работе, мягче, чем в работе [5]. Это можно объяснить различием в геометрии опытов.

Сравнение рассчитанного в работах [1, 2] спектра нейтронов в железе от источника с $E_0 = 14,9$ Мэв с измеренным на расстоянии 40,5 см от источника указало на довольно значительное расхождение в спектрах. Так, при значениях E , равных 1,25 и 4 Мэв, спектры различаются в четыре и шесть раз соответственно. Это, по-видимому, объясняется тем, что в работах [1, 2] при расчетах был сделан ряд упрощающих предположений. В частности, пренебрегалось замедлением при упругом рассеянии, не учитывались нейтроны, попавшие в интервал энергий 6–14 Мэв. Кроме того, определенную роль могли играть неточности в знании величин и угловой зависимости эффективных сечений взаимодействия нейтронов с ядрами железа.

На рис. 4 сравнивается измеренный спектр нейтронов в свинце с рассчитанным в работе [2]. Видно, что совпадение удовлетворительное. В этом случае упругое замедление может играть значительно меньшую роль, а отклонение спектра неупруго рассеянных нейтронов в интервале энергий 6–14 Мэв от максвелловского учитывалось при расчете.

На рис. 5 и 6 приведены спектры нейтронов, измеренные в воде за слоем железа ($E_0 = 3,35$ Мэв) и свинца ($E_0 = 14,9$ Мэв). Спектр нейтронов на значительном расстоянии в воде за слоем свинца или железа для нейтронов от источника с $E_0 = 14,9$ Мэв значительно отличается от спектра нейтронов в чистой воде на таком же расстоянии. Спектр в воде за свинцом оказывается существенно богаче рассеянными и замедленными нейтронами, чем спектр в чистой воде, причем форма спектра рассеянных нейтронов одинакова. Это происходит потому, что поток нейтронов с энергией, близкой к начальной, за слоем свинца или железа становится более изотропным, что приводит к большему

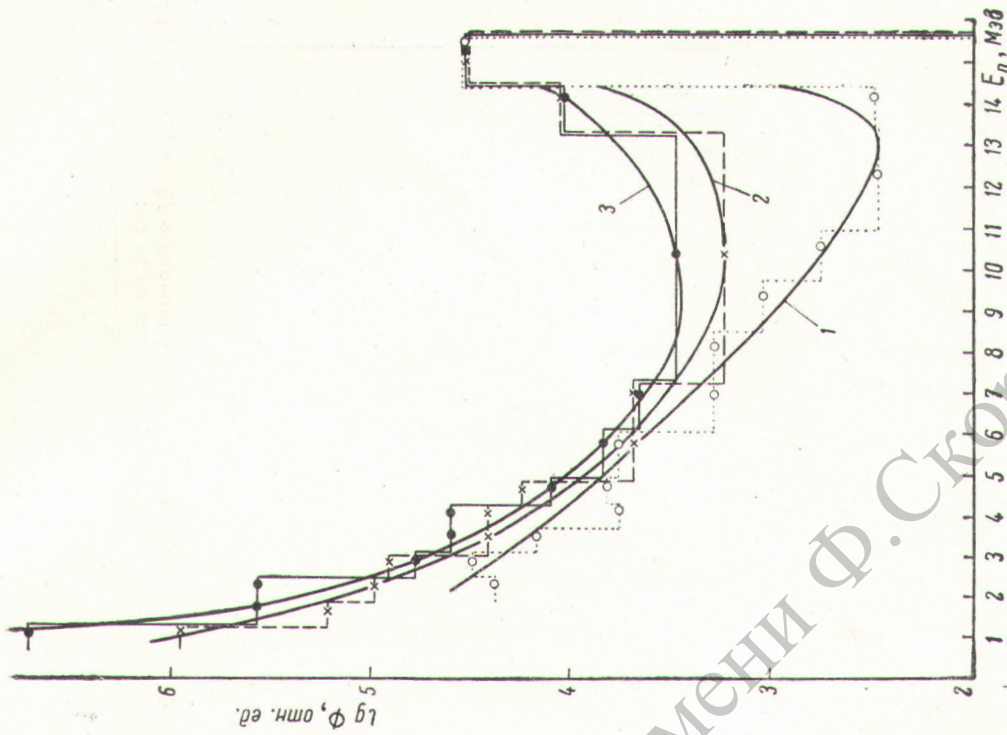


Рис. 2. Спектры нейтронов в железе (источник с $E_0 = 14,9$ Мэв) при следующих значениях ΔE_e , см:
 1 (○) — 10,5; 2 (×) — 26,5; 3 (●) — 40,5.

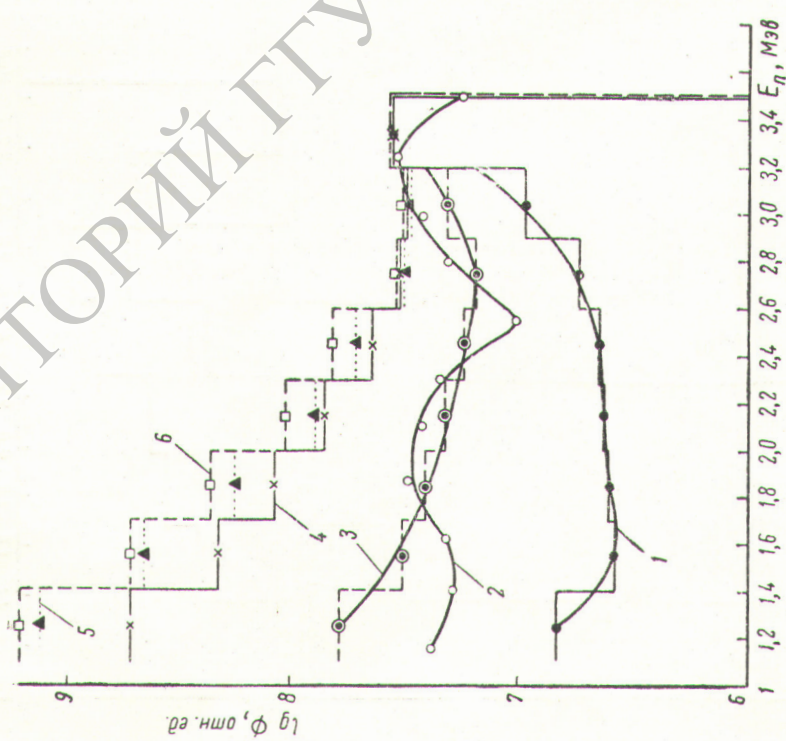


Рис. 1. Спектры нейтронов в железе (источник с $E_0 = 3,35$ Мэв) при следующих значениях ΔE_e , см:
 1 (●) — 0; 2 (○) — 15 [5]; 3 (●) — 10,5; 4 (×) — 25,5; 5 (▲) — 40,5; 6 (□) — 47,5.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф.СКОРНИНЫ

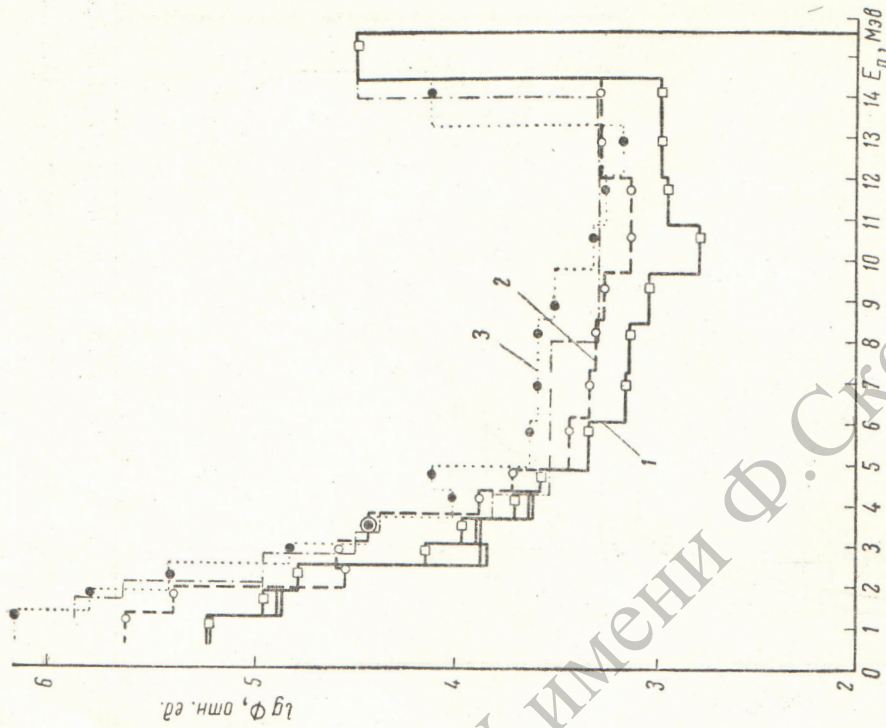


Рис. 4. Спектры нейтронов в свинце (источник с $E_0 = 14,9$ Мэв) при следующих значениях ΔRb , см:

1 (□) — 19,5; 2 (○) — 30,5; 3 (●) — 49,5; — — — — — 49,5 (расчет) [1, 2].

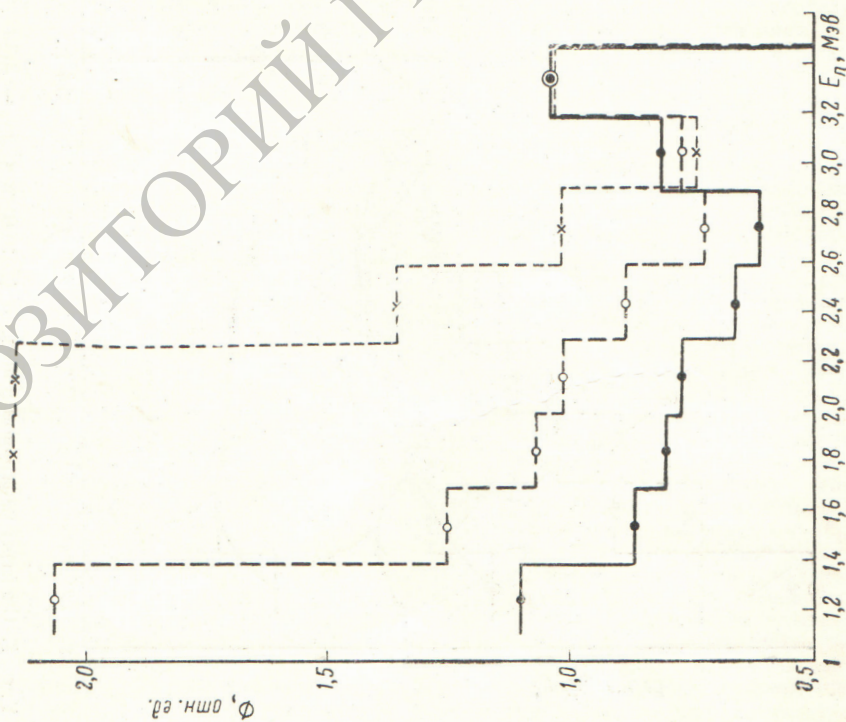


Рис. 3. Спектры нейтронов в свинце (источник с $E_0 = 3,35$ Мэв) при следующих значениях ΔRb , см:

● — 19; ○ — 30; × — 49.

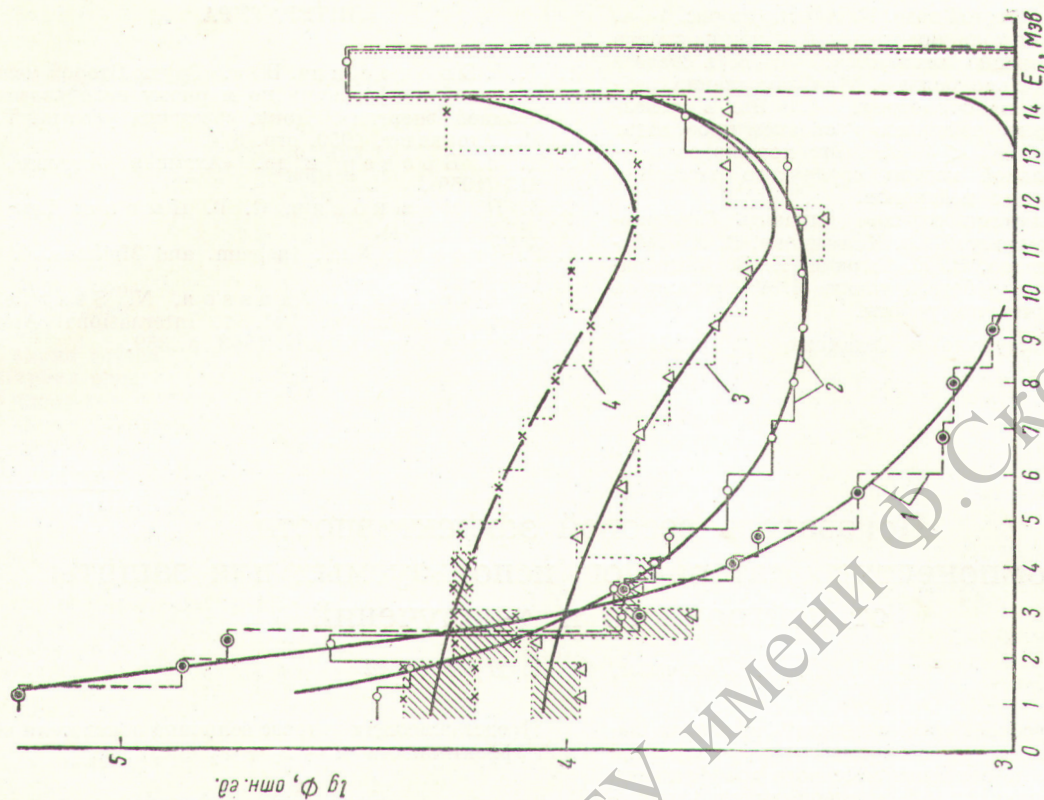


Рис. 6. Спектры нейтронов в свинце и воде (источник с $E_0 = 14,9 \text{ МэВ}$).

Значения ΔRb и ΔH_2O , см:

1 (○) — $\Delta Rb = 19,5$ (свинец); 2 (○) — $\Delta Rb = 18,5$, $\Delta H_2O = 3,5$ (вода за свинцом); 3 (△) — $\Delta H_2O = 46$ (вода); 4 (×) — $\Delta Rb = 19,5$, $\Delta H_2O = 45$ (вода за свинцом).

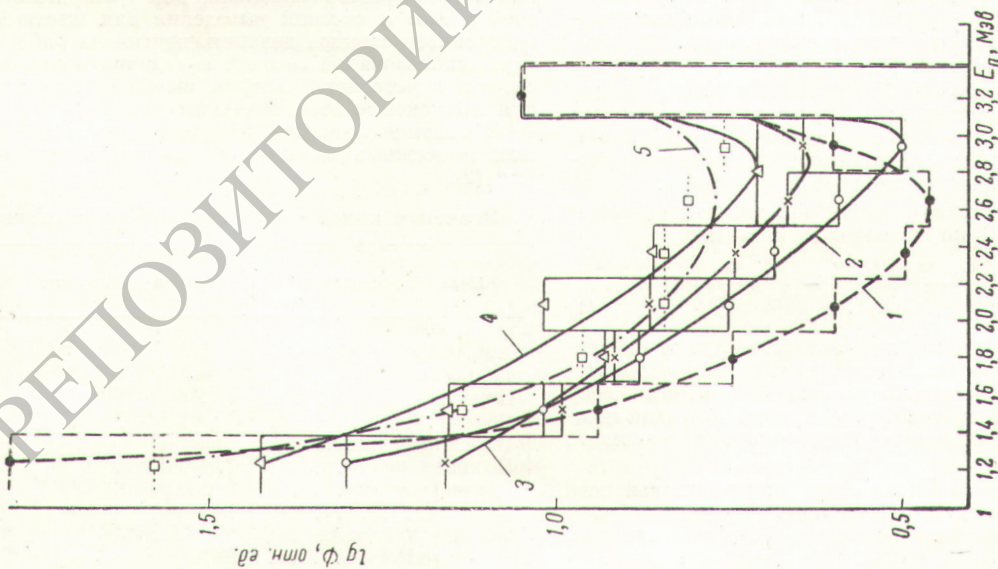


Рис. 5. Спектры нейтронов в железе и воде (источник с $E_0 = 3,35 \text{ МэВ}$).

Значения ΔFe и ΔH_2O , см:

1 (●) — $\Delta Fe = 15$ (железо); 2 (○) — $\Delta Fe = 15$, $\Delta H_2O = 3,5$ (вода за железом); 3 (×) — $\Delta Fe = 15$, $\Delta H_2O = 13,5$ (вода за железом); 4 (△) — $\Delta Fe = 15$, $\Delta H_2O = 33,5$ (вода за железом); 5 (□) — $\Delta H_2O = 36$ (вода).

ослаблению, чем в чистой воде. Как видно из рис. 1—4, по мере увеличения толщины железа или свинца спектр нейтронов существенно смягчается, причем в железе смягчение значительно больше. При замедлении нейтронов от источника с энергией 14,9 Мэв в железе и свинце накопление нейтронов в основном происходит в области энергий $E_n < 4$ Мэв. Это хорошо соответствует испарительной модели неупругого рассеяния при таких энергиях нейтронов.

Авторы пользуются случаем выразить благодарность В. Г. Золотухину, Б. А. Калмыкову, В. И. Лобанову, М. П. Тараско, В. Е. Тыркич, Е. В. Шестопалову за помощь в работе, а также Л. А. Трыкову за обсуждение результатов работы.

Поступило в Редакцию 8/VI 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Л. Бродер и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии». Докл. советских ученых. Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 674.
2. Д. Л. Бродер и др. «Атомная энергия», 7, 313 (1959).
3. В. П. Машкович, С. Г. Цыпин. Там же, 11, 251 (1961).
4. F. Brooks. Nucl. Instrum. and Methods. 4, 151 (1959).
5. G. During, R. Jansson, N. Starfelt. Neutron Dosimetry. Vol. 1. International Atomic Energy Agency. Vienna, 1963, p. 359.

УДК 539.121.73

Показатель весовой эффективности двухкомпонентных материалов, используемых для защиты от нейтронного и γ -излучений

Г. А. Лисочкин, Ф. А. Предовский

Сравнение весовой эффективности различных защитных материалов от нейтронного и γ -излучений легко проводить по величине массового коэффициента ослабления μ/ρ и аналогичной характеристике материала в отношении нейтрона $1/\rho L$, где ρ — плотность материала; L — длина релаксации нейтронного потока.

Во многих случаях один из интересующих нас материалов является по сравнению с другим более эффективным как защита от нейтронов, но уступает ему как защита от γ -излучения, тогда указанные коэффициенты не позволяют сделать вывод, какой из материалов лучше.

При оценке весовой эффективности для двойных композиций, отличающихся обоими компонентами (например, железо — вода и свинец — карбид бора), необходимо учитывать во взаимной связи характеристики поглощения для нейтронов и γ -квантов.

Выразим зависимость суммарной мощности дозы P от изменения веса компонентов x_1 и x_2 как

$$P = P_1 e^{-\left(\frac{x_1}{q_{11}} + \frac{x_2}{q_{12}}\right)} + P_2 e^{-\left(\frac{x_1}{q_{21}} + \frac{x_2}{q_{22}}\right)}, \quad (1)$$

где P_1 и P_2 — мощности доз соответственно от нейтронов и γ -излучения за защитой в исходном варианте; q_{kn} — весовой показатель поглощения, равный весу компонента защиты с номером n , при котором мощность дозы от источника, помеченного индексом k , уменьшается в e раз.

Показателем эффективности двухкомпонентного материала для защиты от нейтронов и γ -квантов будем считать суммарное изменение веса обоих компонентов, которое приводит к изменению мощности дозы от γ -излучения и нейтронов в равное число раз (например, e раз).

Представляющая интерес величина показателя весовой эффективности $K = x_1 + x_2$ имеет вид

$$K = \frac{1}{\frac{1}{q_{11}} - \frac{1}{q_{12}}} + \frac{1}{\frac{1}{q_{22}} - \frac{1}{q_{21}}} \quad (2)$$

В настоящей работе используются значения массовых коэффициентов ослабления для γ -излучения с энергией 6 Мэв и сечения выведения для жесткой части нейтронного спектра деления, взятые из работ [1, 2]. При использовании сечений выведения подразумевается, что в устройстве защиты выполнены необходимые для применения этой величины условия.

В таблице приведен результат сравнения различных возможных композиций на основании выражения (2).

Значение показателей весовой эффективности

Первый компонент	Второй компонент	$K, \text{г/см}^2$
Боргидрид лития . . .	Уран	23,89
Гидрид лития	Уран	24,13
Полиэтилен	Уран	24,15
Вода	Уран	24,74
Боргидрид лития . . .	Свинец	24,88
Полиэтилен	Свинец	25,03
Гидрид лития	Свинец	25,11
Вода	Свинец	25,56
Боргидрид лития . . .	Вольфрам	25,89
Полиэтилен	Вольфрам	25,96
Гидрид лития	Вольфрам	26,12