

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Гончаров и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии». Докл. советских ученых. Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 243.

2. «Атомная техника за рубежом», № 6, 19 (1963).
3. S. Hachen, H. Rae. Nucl. Sci. and Engng, 10, 316 (1961).



УДК 621.039.538.4

Ослабление излучений реактора в серпентинитовом песке

Г. А. Васильев, А. П. Веселкин, Ю. А. Егоров,
Г. Г. Моисеев, Ю. В. Панкратьев

Приводятся результаты экспериментального изучения ослабления излучений реактора в серпентинитовом песке, имеющем насыпной удельный вес $1,62 \text{ г/см}^3$. Исследованный песок содержит около 11,5% химически связанной воды, выделяющейся при температурах выше 450°C .

Проведены измерения ослабления потоков быстрых и тепловых нейтронов, ослабления мощности дозы нейтронов и γ -излучения, а также спектров быстрых нейтронов в серпентинитовом песке. Вычисленные на основании экспериментальных данных длины релаксации быстрых нейтронов сравниваются с длинами релаксации быстрых нейтронов в карбиде бора, серпентинитовом бетоне и железорудном концентрате.

монолитов не требует никаких дополнительных затрат и может осуществляться параллельно с разработкой залежей асбеста. Во многих местах трещиноватость серпентинита незначительна, что дает возможность получать монолиты объемом $\sim 1 \text{ м}^3$ и более.

В серпентините наряду с магнием, железом и кремнием содержится связанная вода, выделяющаяся только при нагреве серпентинита до температур выше 450°C [3], что позволяет рассматривать его как высокотемпературный материал, который можно использовать для биологической защиты ядерных реакторов. Концентрация ядер водорода в серпентините около 1,5 вес.%, что вполне достаточно для обеспечения одинакового ослабления потока промежуточных и быстрых нейтронов.

При сооружении защиты серпентинит можно использовать как заполнитель для бетона, а также в виде засыпки цельнопиленых блоков. Удельный вес монолитного серпентинита примерно $2,6 \text{ т/м}^3$; теплопроводность $2,16\text{--}2,56 \text{ ккал/м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C}$ [4]. При распиловке серпентинит хорошо держит кромку, что позволяет получать изделия, отличающиеся точностью размеров и обладающие прочностью на сжатие, равной $400\text{--}600 \text{ кг/см}^2$.

Результаты экспериментального изучения защитных свойств серпентинитового бетона описаны в работе [5]. Данных по ослаблению излучений реактора в засышке из серпентинита в литературе не встречается.

Следует отметить, что в последнее время повышается интерес к рудам и горным породам, которые можно использовать для биологической защиты ядерных реакторов. Так, в работе [6] изучались защитные свойства стандартного железорудного обогащенного концентрата, содержащего ~ 60 вес.% Fe, ~ 30 вес.% O и незначительное количество Si, Mg, Ca, Al и других элементов. Эксперименты, проведен-

Серпентинитовая порода, представляющая интерес как материал, который используется для биологической защиты ядерных реакторов, почти целиком состоит из серпентина. Этот минерал относится к группе водных силикатов магния; состав его выражается химической формулой $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2$. Соотношение окислов (вес.%): MgO 43; SiO_2 44,1; H_2O 12,9. В виде примесей обычно присутствуют FeO , Fe_2O_3 и NiO . Удельный вес серпентина $2,5\text{--}2,7 \text{ г/см}^3$.

В СССР серпентинитовые массивы широко распространены на Урале, Северном Кавказе, в Закавказье, Сибири и Казахстане. Месторождениям серпентинита обычно сопутствуют месторождения асбеста. В настоящее время в мире Баженовское месторождение асбеста, а также месторождения в Казахской ССР и Тувинской автономной области. На заводах Баженовского месторождения выход товарного асбеста из 1 т переработанной руды равен 80 кг [1]; оставшаяся масса состоит в основном из серпентинита. В работе [2] сообщается, что в карьере центрального участка Баженовского месторождения обнаружены залежи чистого, не содержащего асбест серпентинита. По утверждению авторов указанной работы, добыча

ные на реакторе БР-5, показали, что длина релаксации нейтронов в указанном материале изменяется в зависимости от энергии нейтронов от 14 до 25 см (при $\gamma = 2,6 \text{ т/м}^3$). Так как железорудный концентрат не содержит водорода, длина релаксации тепловых и надтепловых нейтронов в нем оказалась весьма большой: 20—21 см (использовались индикаторы из меди и индия). При введении в концентрат примерно 3 вес.% воды длина релаксации уменьшается в зависимости от энергии нейтронов до 11—13,3 см. Однако, как отмечают авторы работы [6], водный компонент железорудной защиты при высоких температурах неустойчив.

В более ранней работе [7] приводятся данные по ослаблению излучений реактора АSTR в песке, глине и других широко распространенных материалах. Значения длин релаксаций быстрых нейтронов, оцененные нами по опубликованным результатам измерений дозиметром Херста на толщинах материалов 0—152 см, составляют для сухого песка 18,1 см ($\gamma = 1,71 \text{ г/см}^3$), для влажного песка 11,2 см ($\gamma = 2,02 \text{ г/см}^3$; 15,2 вес.% воды); для глины 11,8 см ($\gamma = 1,35 \text{ г/см}^3$; 8,1 вес.% воды). Значение длины релаксации, рассчитанное из функции ослабления потока быстрых нейтронов для глины, кажется нам весьма заниженным. Для глины с насыщенным удельным весом $1,35 \text{ г/см}^3$ оно должно составлять примерно 17 см.

Изучение защитных свойств серпентинита проводили на водо-водяном исследовательском реакторе. Использовался серпентинит с Баженовского месторождения в виде мелкого песка фракции 0—2 мм с включением волокон асбеста. Его химический состав приведен в табл. 1. Ящики с серпентинитовым песком устанавливали в ступенчатой нише, имеющейся в защите реактора, вплотную к баку активной зоны (размеры ящиков $680 \times 680 \times 300$ и $940 \times 940 \times 400$ мм). Максимальная толщина слоя серпентинита составляла около 180 см. При

засыпке серпентинита в ящики трамбовку или виброуплотнение, а также удаление волокон асбеста не проводили. Насыпной удельный вес серпентинита был равен $1,62 \text{ т/м}^3$.

Измерения проводили в условиях «полубесконечной» и «барьерной» геометрии. В первом случае индикаторы и датчики вводились в тонкостенные дюралевые трубы, установленные в ящиках. В этой геометрии по методу определения наведенной активности были изучены функции ослабления потоков быстрых и медленных нейтронов, а также с помощью спинтилляционного дозиметра определена мощность дозы γ -излучения [8]. Пороговые индикаторы $\text{Al}(n, \alpha)$; $\text{Al}(n, p)$; $\text{P}(n, p)$; $\text{In}(n, n')$ помещали в борно-кадмиевые фильтры. Ослабление потока тепловых и надтепловых нейтронов измеряли индикаторами из диспрозия (Dy^{164}) в кадмии и без кадмия.

В барьерной геометрии изучали энергетические распределения быстрых нейтронов после прохождения различных по толщине слоев серпентинита, а также ослабление мощности дозы нейтронов. Спектры быстрых нейтронов измеряли однокристалльным спектрометром с разделением импульсов, обусловленных нейтронами и γ -квантами, путем создания пространственного заряда на последних диодах ФЭУ [10]. Измерения проводили за слоями серпентинита толщиной 0; 30; 60; 90; 100 и 140 см.

Ослабление потока быстрых нейтронов

Для предварительной оценки защитных свойств серпентинитового песка, имеющего насыпной удельный вес $\sim 1,62 \text{ т/м}^3$ и химический состав, приведенный в табл. 1, было рас-

Таблица 2

Концентрация ядер элементов, входящих в состав серпентинита, и эффективные сечения выведения быстрых нейтронов ($\gamma = 1,62 \text{ г/см}^3$)

Элемент	Микроскопические сечения, барн [13]	Концентрация ядер в 1 см^3 серпентинита, $\times 10^{22}$ ядер/см ³	Макроскопическое сечение выведения, см ⁻¹
Водород	1	1,25	0,0125
Магний	1,22	0,905	0,010
Кремний	1,26	0,626	0,0079
Кислород	0,92	2,996	0,0272
Железо	1,9	0,10	0,0019
Алюминий	1,31	0,030	0,0004
Кальций	1,58	0,019	0,0003

Таблица 1

Содержание окислов в серпентините

Окислы	SiO_2	MgO	$\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$	Al_2O_3	CaO	SO_3	H_2O	Прочие
Содержание, вес. %	38,83	37,39	8,47	1,60	1,12	0,18	11,48	0,93

считано макроскопическое сечение выведения быстрых нейтронов, которое оказалось равным $0,0602 \text{ см}^{-1}$ (табл. 2). Основной вклад в сече-

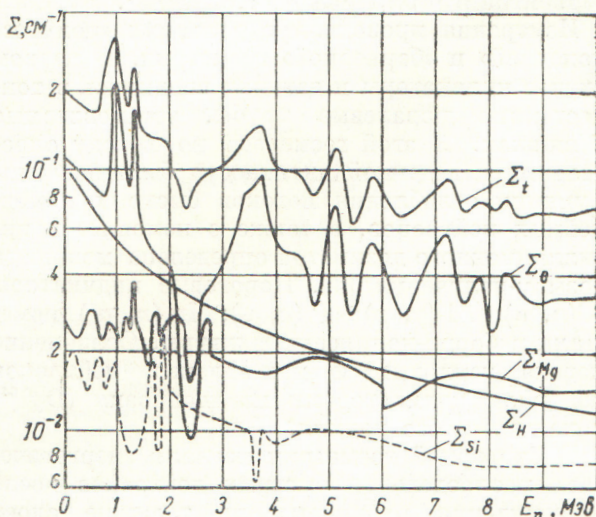


Рис. 1. Макроскопические сечения взаимодействия нейтронов для серпентинита (Σ_t) и его составляющих.

ние выведения быстрых нейтронов для серпентинита вносит кислород ($\sim 45\%$) и водород ($\sim 21\%$). На рис. 1 показана зависимость полного сечения от энергии нейтронов для серпентинита и его основных составляющих. Нерегулярности (пики и провалы) в поведении полного сечения обусловлены в основном характером зависимости полного сечения кислорода от энергии нейтронов.

Графики функции ослабления потока быстрых нейтронов четырех энергетических групп, измеренные пороговыми индикаторами, приведены на рис. 2. По данным работы [11], эффективные энергетические пороги индикаторов $\text{Al}(n, \alpha)$, $\text{Al}(n, p)$ и $\text{P}(n, p)$ равны 7; 5 и 3 Мэв соответственно. Эффективный энергетический порог для индикатора из индия может быть принят равным $\sim 1,5 \text{ Мэв}$. Приведенные на рис. 2 кривые построены с учетом фактора геометрического ослабления потока быстрых нейтронов вдоль оси ниши. Из рисунка следует, что ослабления потока быстрых нейтронов указанных энергетических групп происходят по экспонентам, причем величина длины релаксации нейтронов каждой группы в пределах измеренных толщин остается постоянной.

Длины релаксации быстрых нейтронов различных энергетических групп в серпентините (в виде песка и монолита), вычисленные по

данным измерений индикаторами, приведены в табл. 3. Там же для сравнения приведены аналогичные данные для карбида бора [9], серпентинитового бетона [5] и железорудного концентрата [6]. Ошибка в определении длины релаксации быстрых нейтронов в серпентините не превышает 4%. Длины релаксации для монолитного серпентинита рассчитывались из

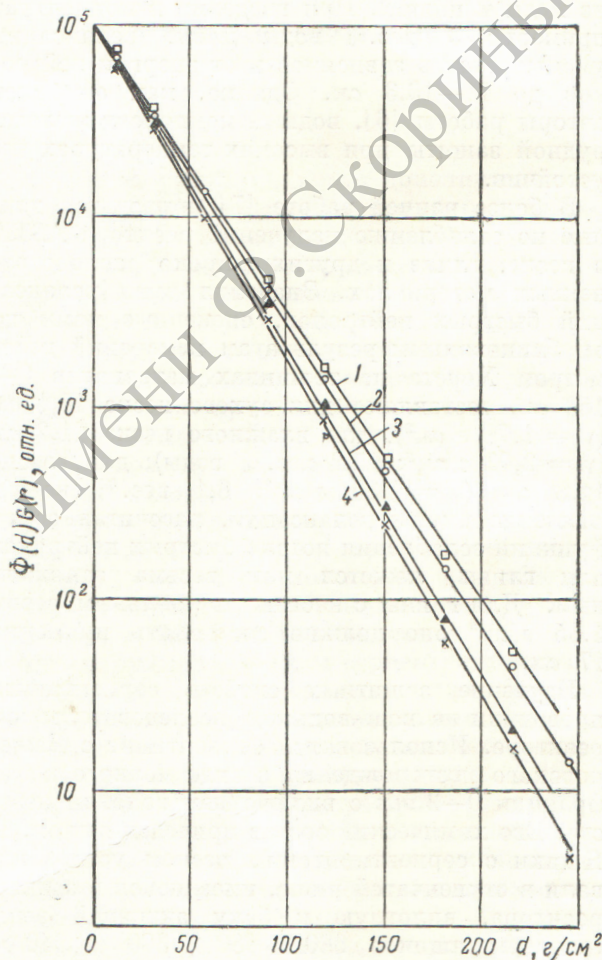


Рис. 2. Ослабление потоков быстрых нейтронов в засыпке из серпентинита, измеренное индикатором: 1 — $\text{Al}(n, \alpha)$; 2 — $\text{Al}(n, p)$; 3 — $\text{P}(n, p)$; 4 — $\text{In}(n, n')$.

предположения, что они изменяются обратно пропорционально его плотности. Из сравнения данных, приведенных в табл. 3, видно, что длина релаксации быстрых нейтронов в серпентинитовом песке ($\gamma = 1,62 \text{ м/м}^3$) такая же, как и в карбиде бора ($\gamma = 1,3 \text{ м/м}^3$). Защитные свойства серпентинитовых монолитных блоков от потока быстрых нейтронов существенно выше, чем у брикетов из железорудного кон-

Таблица 3

Длины релаксации быстрых нейтронов в различных защитных материалах

Материал	γ , т/м ³	Эффективный порог детектора, Мэв			
		1,5	3	5	7
Серпентинитовый песок . .	1,62	15,2	15,7	17	17,7
Карбид бора . .	1,3 *	—	15,7	—	—
Серпентинитовый бетон . .	2,2	10,9	10,9	11,2	11,6
Железорудный концентрат	2,6	—	14,6	—	15,0
Железорудный концентрат с 3 вес. % воды	2,6	12,5 **	12,8	—	13,3
Монолитный серпентинит	2,6	9,5	9,8	10,6	11,0

* Более высокая плотность засыпки из карбида бора практически недостижима.

** Измерено камерой деления с Th^{232} , $E_{\text{эфф}} \approx 2 \text{ Мэв}$ [6].

центра и незначительно выше по сравнению с серпентинитовым бетоном.

Спектры быстрых нейтронов после прохождения слоев серпентинита различной толщины

Энергетические распределения быстрых нейтронов, прошедших слой серпентинита толщиной 0; 30; 60; 100 и 140 см, показаны на рис. 3. Для снижения фона γ -излучения в процессе измерений перед активной зоной постоянно находился слой свинца толщиной 10 см. Из рис. 3 следует, что спектры быстрых нейтронов изменяются в основном в области энергий 3–8 Мэв. «Провал» спектра в области 3–5 Мэв, очевидно, обусловлен пиком в полном сечении кислорода при энергии нейтронов 3,8 Мэв. В области энергий 5–8 Мэв наблюдается некоторое накопление нейтронов.

По данным измерения спектров были рассчитаны длины релаксации нейтронов отдельных энергетических групп (табл. 4). Ошибки в измерениях длин релаксаций составляют 3–5%.

Из сравнения данных табл. 3 и 4 следует, что значения длин релаксации нейтронов с энергиями больше 1,5; 3; 5; 7 Мэв, полученные из измерений индикаторами и в результате обработки спектров, хорошо согласуются (особенно для первых двух групп). Полученные значения

Таблица 4

Длины релаксации энергетических групп нейтронов в серпентинитовом песке, рассчитанные по данным измерений спектров

E_n , Мэв	0,9–1,5	1,5–2,5	2,5–4	4–10
λ , см	14,9	15,2	14,9	15,7
E_n , Мэв	1,5–12	3–12	5–12	7–12
λ , см	15,3	15,7	16,3	17

длин релаксации быстрых нейтронов указанных энергетических групп можно использовать при многогрупповом расчете защиты.

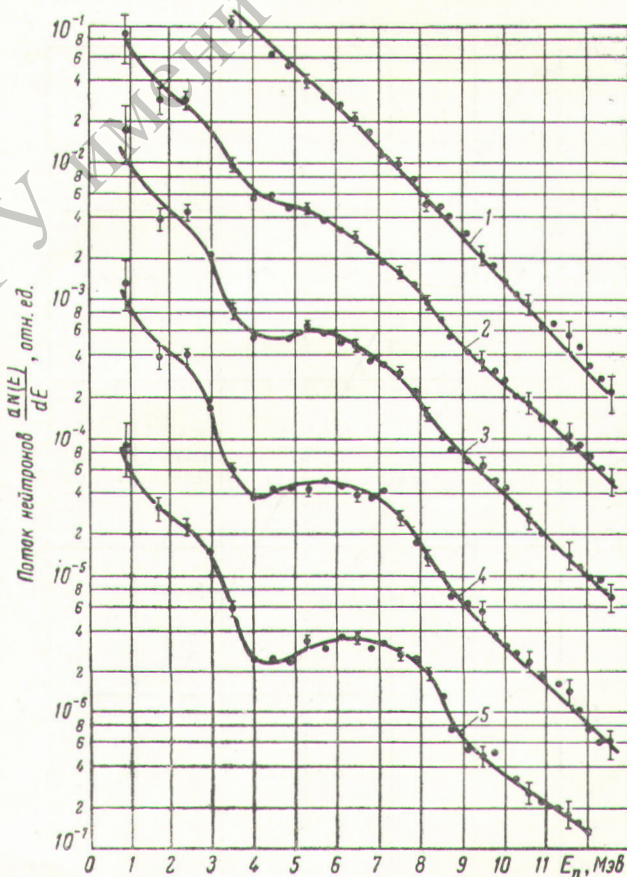


Рис. 3. Энергетические распределения быстрых нейтронов после прохождения слоев серпентинита различной толщины, см:

1 — 0; 2 — 30; 3 — 60; 4 — 100; 5 — 140.

Ослабление потока тепловых и надтепловых нейтронов

На рис. 4 приведены функции ослабления потоков тепловых и надтепловых нейтронов (с учетом фактора геометрического ослабления), а также кадмиевое отношение. Из рисунка следует, что на малых толщинах серпентинита наблюдается некоторое накопление тепловых и надтепловых нейтронов. Начиная с толщины ~ 30 г/см² ослабление происходит по экспоненте с постоянной длиной релаксации в пределах измеренных толщин. Величина длины релаксации тепловых и надтепловых нейтронов равна 15,2 см. Такую же длину релаксации имеют нейтроны с энергиями больше 1,5 Мэв.

Полученная величина длины релаксации тепловых и надтепловых нейтронов в серпентинитовом песке намного меньше длины релак-

сации тепловых и надтепловых нейтронов в железорудном концентрате (20—21 см). Это объясняется присутствием значительного количества воды в серпентините (уменьшается накопление замедлившихся нейтронов).

Ослабление мощности дозы нейтронов

Ослабление мощности полной дозы в условиях барьерной геометрии измерялось изодозным детектором нейтронов и универсальным сцинтилляционным радиометром РУС-5 [12]. С помощью прибора РУС-5 было также измерено ослабление мощности дозы промежуточных нейтронов (в диапазоне энергий 0,4 эв — 0,5 Мэв). Кривая ослабления мощности дозы нейтронов с энергиями больше 0,5 Мэв была получена путем сравнения результатов измерений мощности полной дозы и дозы промежуточных нейтронов прибором РУС-5. Измерения счетчиком быстрых нейтронов дали возмож-

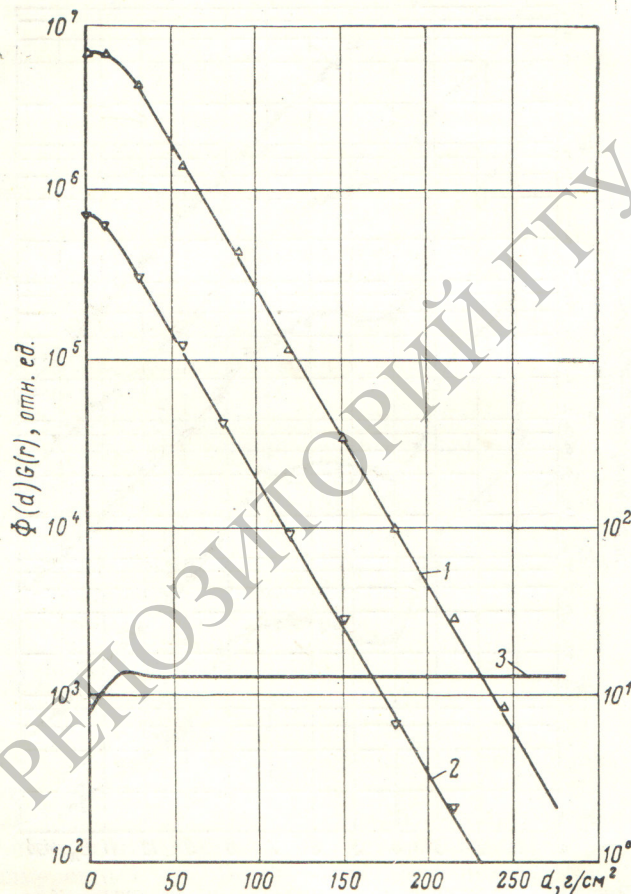


Рис. 4. Ослабление потока тепловых (1) и надтепловых (2) нейтронов и кадмиевое отношение (3) в засыпке из серпентинита.

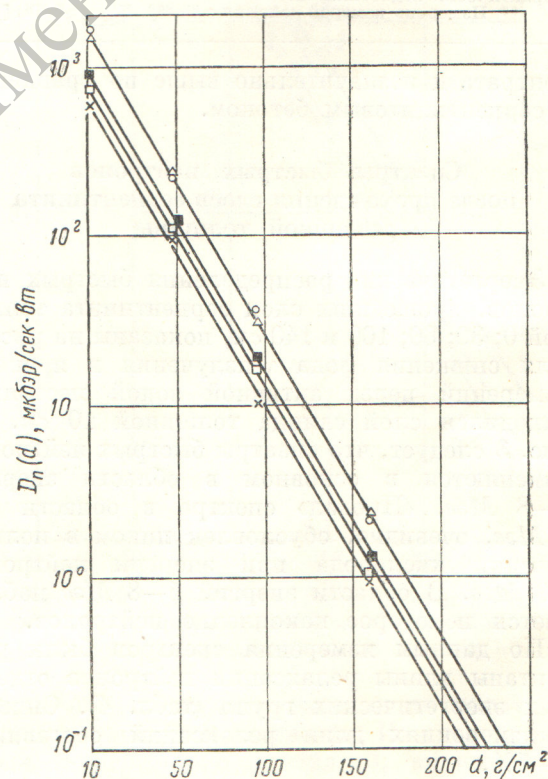


Рис. 5. Ослабление мощности дозы нейтронов после прохождения различных слоев серпентинита:

○ — полная доза (изодозный детектор [14]); △ — полная доза (РУС-5); ■ — доза быстрых нейтронов (РУС-5); □ — доза быстрых нейтронов ($E_n > 2$ Мэв); × — доза промежуточных нейтронов (РУС-5).

ность оценить ослабления в серпентините мощности дозы нейтронов с энергиями больше 2 Мэв .

На рис. 5 приведено (в абсолютных единицах) ослабление в серпентините мощности полной дозы, дозы быстрых и промежуточных нейтронов. Наклон кривых ослабления доз одинаков и в пределах измеренных толщин серпентинита не изменяется. Длина релаксации дозы, вычисленная по кривым ослабления, составляет $15,2\text{ см}$. Таким образом, ослабление полной и парциальных доз нейтронов определяется ослаблением потока нейтронов с $E_n > 1,5\text{ Мэв}$. Из рис. 5 следует, что отношение величины полной дозы нейтронов к дозе нейтронов с $E_n > 2\text{ Мэв}$ равно двум и в пределах измеренных толщин серпентинита остается постоянным.

Ослабление γ -излучения в серпентините

Ослабление мощности дозы γ -излучения в серпентините измерялось сцинтилляционным дозиметром. Длина релаксации дозы для слоя серпентинита толщиной 270 г/см^2 составляет около 22 см . Эта величина находится в согласии с длиной релаксации дозы γ -излучения в серпентинитовом бетоне с приведенной плотностью $1,62\text{ г/см}^3$, для которого $\lambda_\gamma \approx 20\text{ см}$ [5] (расхождение составляет 10%).

Заключение

Результаты экспериментов показали, что засыпка из серпентинитового песка по своим защитным свойствам не уступает засышке из карбида бора, насыпной вес которой даже после тщательного уплотнения не превышает $1,3\text{ т/м}^3$. Кроме того, стоимость 1 т серпентинита составляет менее 3 руб.

Серпентинитовый песок, используемый в качестве защиты от быстрых нейтронов, уступает железорудному концентрату; однако монолитный серпентинит при одинаковой с железорудным концентратом плотности имеет значительно меньшие длины релаксации. Присутствие в серпентините около $11\text{ вес.}\%$ связанной воды обеспечивает высокую эффективность защиты по отношению к промежуточным нейтронам (даже при температурах до 450°C); длина

релаксации промежуточных нейтронов в нем значительно меньше, чем в железорудном концентрате.

Защитные свойства серпентинитовой засыпки могут быть улучшены, если в нее добавить железо. Известно, что для одинакового ослабления потока быстрых и промежуточных нейтронов в железо-водной смеси должно содержаться не менее $0,3\text{ вес.}\%$ водорода. Такая концентрация водорода обеспечивается в смеси, состоящей из $25\text{ вес.}\%$ серпентинита и $75\text{ вес.}\%$ железа. В подобной смеси длина релаксации полной дозы нейтронов составит примерно $8,5\text{—}9\text{ см}$ (при насыпном весе смеси $4,5\text{—}5\text{ г/см}^3$). Смесь с таким насыпным весом может быть получена при тщательном подборе гранулометрического состава компонентов.

Авторы благодарят сотрудников, обслуживающих реактор и участвовавших в экспериментах.

Поступила в Редакцию 29/I 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Требования промышленности к качеству минерального сырья. Асбест. Вып. 5. М., Гостеолтехиздат, 1959.
2. Н. С. Круцко, Ю. С. Соловьев. «Труды Горно-геологического института», вып. 56, 149 (1961).
3. Хангерфорд и др. «Атомная техника за рубежом», № 10, 20 (1960).
4. В. Н. Кабанова. Физические свойства горных пород. М., Гостоптехиздат, 1962.
5. Г. А. Васильев и др. «Атомная энергия», 18, 121 (1965).
6. В. К. Даруга и др. «Атомная энергия», 17, 63 (1964).
7. Wheller D. M., Bostick L. H. Military field expedient shielding experiment. Comair Nuclear Research and Development Laboratory, October 18, 1960, DA-44-192-ENC-13.
8. В. Н. Аваев и др. В сб. «Вопросы физики защиты реакторов». М., Госатомиздат, 1963, стр. 260.
9. Д. Л. Бродер и др. Там же, стр. 60.
10. В. Н. Аваев и др. «Атомная энергия», 15, 20 (1963).
11. Б. И. Синицын, С. Г. Цыпин. «Атомная энергия», 14, 306 (1962).
12. И. Б. Кеирим-Маркус и др. «Атомная энергия», 15, 336 (1963).
13. Reactor Handbook. Ed. C. Tipton. N. Y., 1960. V. 1, p. 1027.
14. Х. Д. Андросенко, Г. И. Смиренин. «Приборы и техника эксперимента», № 5, 64 (1962).

