

Авторы благодарят М. Я. Кулаковского за участие в обсуждении результатов экспериментов и А. А. Гончаренко за помощь в работе.

Поступило в Редакцию 18/XII 1963 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Гольдштейн. Основы защиты реакторов. М., Госатомиздат, 1961.
2. Защита транспортных установок с ядерным двигателем. Сборник переводов под ред. В. В. Орлова, С. Г. Цыпина. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
3. V. Duggal, S. Puri. J. Appl. Phys., 29, 675 (1958).
4. Д. Л. Бродер и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному исполь-

- зованию атомной энергии». Докл. сов. ученых. Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 674.
5. В. С. Березин и др. «Атомная энергия», 2, 118 (1957).
6. D. Hughes. Nucleonics, 1, 30 (1953).
7. А. И. Лейпунский и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии». Докл. сов. ученых. Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 377.
8. А. И. Лейпунский. «Атомная энергия», 5, 277 (1958).
9. А. И. Лейпунский. «Атомная энергия», 7, 192 (1959).
10. С. Г. Цыпин. «Атомная энергия», 12, 300 (1962).
11. В. П. Машкович, С. Г. Цыпин. «Атомная энергия», 11, 251 (1961).
12. В. А. Дулин и др. «Атомная энергия», 9, 315 (1960).

УДК 621.039.538/539.125.52

Исследование пространственно-энергетического распределения нейтронов реактора БР-5 в железорудной среде

В. К. Даруга, И. И. Лазуткин, А. Н. Николаев, Д. М. Пинхасик,
В. К. Сахаров, Б. И. Силицын, С. Г. Цыпин

Исследуется возможность применения в качестве защиты ядерных реакторов относительно дешевой железорудной среды с высоким содержанием железа и легких элементов (кислорода), удобной для монтажа и способной выдерживать высокие температуры без существенных изменений своих свойств.

В качестве исходного материала использовался стандартный железорудный обогащенный концентрат следующего состава: ~60 вес. % Fe; ~30 вес. % O₂; 8-10 вес. % Si, Mg, Ca, Al; ~1 вес. % Mn, Pb, Cu, Ti, S. Для придания подходящих конструктивных свойств в концентрат введены небольшие связующие добавки. Конечный продукт характеризуется хорошей теплопроводностью и термостойкостью.

Было исследовано также влияние на защитные свойства железорудной среды матой добавки водорода (~0,3 вес. %). Для этого в процессе изготовления в материал вводилась соответствующая добавка воды в связанном виде.

Исследования проводились на установке Б-2 реактора БР-5 [1]. Источником нейтронов служил экспериментальный канал, идущий от никелевого отражателя активной зоны с углом расхождения пучка ~5° и диаметром на выходе 300 мм. Спектр нейтронов в области $E > 3$ Мэв совпадал со спектром деления, а при меньших энергиях [2, 3] был мягче последнего.

Экспериментальное устройство представляло собой стальной бак размерами 137×139×217 см, укрепленный на массивной тележке, передвигающейся по рельсам [4]. В бак загружалась исследуемая среда, и все устройство задвигалось в нишу в бетонной защите. Ось пучка проходила через центр передней стенки параллельно дну бака на расстоянии 70 см от его верхнего края. Для измерения пространственного распределения нейтронов в призме исследуемого материала вдоль оси пучка на определенных равных расстояниях друг от друга (18,5 см) были сделаны вертикальные каналы для помещения детекторов. Во всех случаях для устранения пустот свободное пространство каналов

заполнялось пробками из того же материала, что и среда. Такое устройство позволяло в условиях практически бесконечной геометрии определить пространственно-энергетическое распределение нейтронов в защите в зависимости от расстояния r от передней стенки призмы и высоты h от оси пучка.

В качестве детекторов быстрых нейтронов использовались алюминийевые и серные пороговые индикаторы (эффективные пороги ~7 и ~3 Мэв соответственно) и ториевая камера деления (порог ~2 Мэв). Для измерения общего распределения быстрых нейтронов применялся счетчик протонов отдачи с характеристикой, близкой к дозовой, и энергетическим порогом 0,5 Мэв [5]. Детекторами тепловых и надтепловых нейтронов служили медные и индиевые резонансные индикаторы с кадмиевым покрытием и без него. Полные характеристики указанных детекторов приведены в других работах [6, 7]. Там же подробно изложена методика снятия показаний детекторов и обработки экспериментальных данных. Заметим, что ошибка отдельного измерения составляла в среднем 5% и в худшем случае не превышала 10%.

По результатам измерений всеми детекторами строились кривые пространственно-энергетического распределения нейтронов от дискового мононаправленного источника в изучаемой среде. Для изучения интегральной характеристики прохождения нейтронов через защиту и сравнения с результатами других работ функция ослабления дискового мононаправленного источника была, как и в работе [6], преобразована к функции ослабления плоского бесконечного мононаправленного источника:

$$G_{\infty}(r) = C \int_0^{\infty} G_{д.м}(r, h) h dh. \quad (1)$$

Результаты преобразований представлены на рис. 1 и 2. Эти графики показывают значения функции ослабления нейтронов G_{∞} в изучаемой среде в зависимости

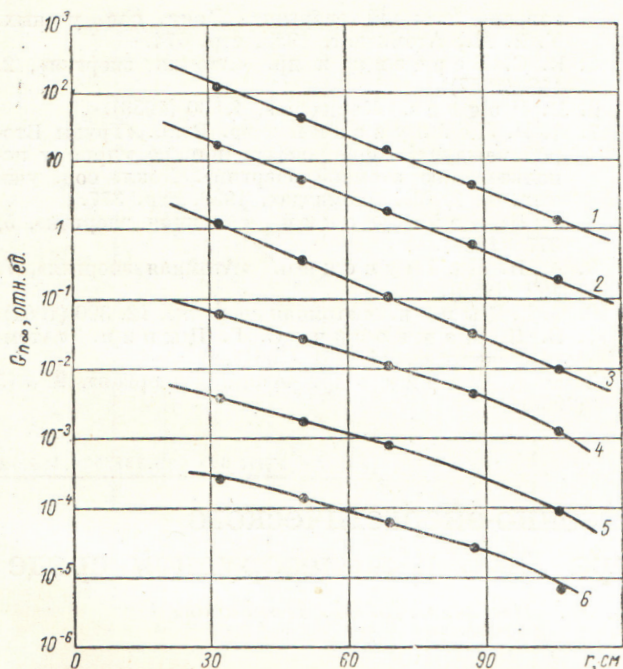


Рис. 1. Функция ослабления нейтронов в железорудной защите (r — толщина защиты вдоль оси пучка).
Использовались детекторы:
1 — Al; 2 — S; 3 — счетчик протонов отдачи; 4 — Cu в Cd; 5 — Cu; 6 — In.

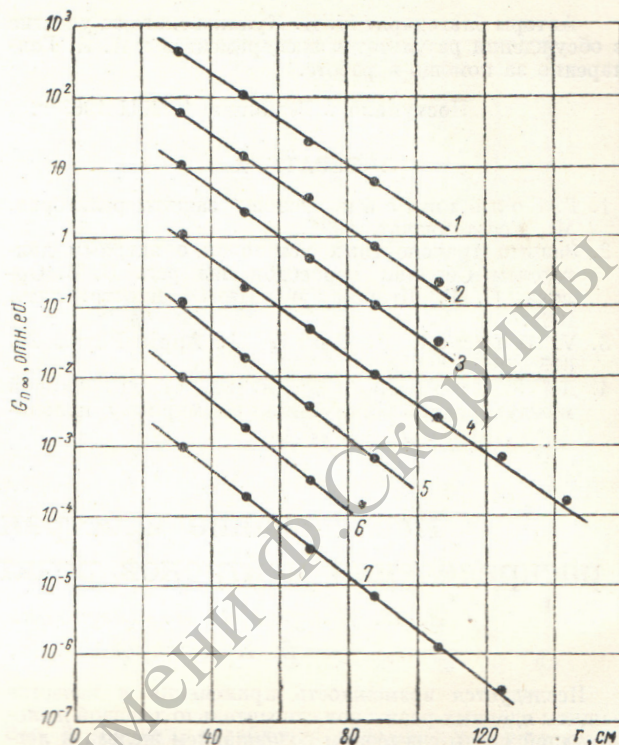


Рис. 2. Функция ослабления нейтронов в железорудной защите, содержащей ~ 0,3 вес. % водорода.
Использовались детекторы:
1 — Al; 2 — S; 3 — Th; 4 — счетчик протонов отдачи; 5 — Cu в Cd; 6 — Cu; 7 — In.

от расстояния r до источника, т. е. фактически до передней стенки призмы. На рис. 3 для сравнения показаны функции ослабления быстрых нейтронов $G_{n,0}$ в исследуемой среде, а также в железе и железо-углеродной смеси, измеренные счетчиком протонов отдачи [6]. По кривым рис. 1 и 2 для изучаемой среды были определены длины релаксации нейтронов соответствующих энергий в интервале расстояний r от 30 до 100 см. Суммарная ошибка в их определении при этом не превышала 10%. Полученные таким образом длины релаксаций нейтронов сведены в табл. 1 и 2. Там же приведены некоторые данные других работ для железосодержащих защит [2, 6, 8].

Так как средняя плотность собранной призмы из железорудной среды составила $2,4 \text{ г/см}^3$, а плотность ее водородсодержащей модификации $2,6 \text{ г/см}^3$, для удобства сравнения длины релаксации нейтронов для обоих вариантов в таблицах приведены к одной плотности $2,6 \text{ г/см}^3$.

Интересно проверить предложение использовать сечение выведения для расчета ослабления потока нейтронов с энергией выше 3 Мэв от источника нейтронов с энергетическим распределением, аналогичным распределению нейтронов спектра деления в безводородных смесях [9]. Этим методом был проведен расчет для железорудной среды по формуле

$$\frac{1}{\lambda_{\text{см}}} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{\text{выв}i} P_i}{A_i} N_{\text{АЧ}}, \quad (2)$$

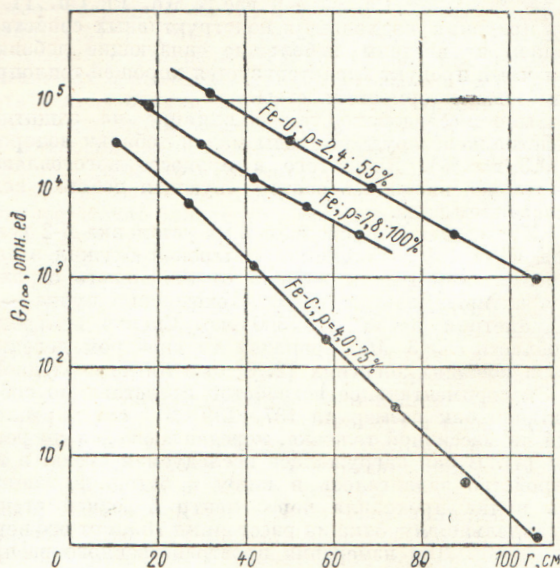


Рис. 3. Сравнение ослабления быстрых нейтронов в железе, железо-углеродной и железорудной защитах (на кривых указаны средние плотности сборок и содержание железа в вес. %).

Таблица 1

Длины релаксации нейтронов в железе, железо-графитовой и железорудной средах, см

Детектор	Порог, Мэв	Железо [2]	Железо — графит [6]	Железорудная среда
Al ²⁷ (n, α)	~7	6,3	10,4	15,0
S ³² (n, p)	~3	6,5	9,6	14,6
Th ²³² (n, f)	~2	7,5	9,1	—
Счетчик	~0,5	13,5*	11,0	13,9
In в Cd	—	—	9,1	20,0
In	—	—	—	20,0
Cu в Cd	—	24,0	10,8	20,0
Cu	—	24,0	—	21,0

* Из работы [6].

Таблица 2

Влияние малой добавки водорода на ослабление нейтронов в железной и железорудной средах

Детектор	Длина релаксации, см	
	железо-водная смесь *	железорудная среда **
Al ²⁷	7,5	13,3
S ³²	7,3	12,8
Th ²³²	—	12,5
Счетчик	—	12,5
In в Cd	—	11,0
Cu в Cd	—	11,0
Cu	7,7	11,0

* Содержание воды 2,8 вес.% [8].
** Содержание воды ~3,0 вес.%.

где $\sigma_{\text{выв}}^i$ — сечение выведения для i -го элемента смеси ($\sigma_{\text{выв}}^i$ для железа и других элементов взято из работы [10], для кислорода — из [9]); P_i — весовое содержа-

ние i -го элемента; A_i — атомный вес i -го элемента; N_A — число Авогадро; ρ — средняя плотность защиты.

Рассчитанная таким образом длина релаксации λ практически совпала с экспериментальной величиной, полученной по измерениям серным индикатором с порогом 3 Мэв (см. табл. 1). Как и ожидалось, наличие небольшой добавки водорода полностью определило характер ослабления нейтронов в железорудной среде в области энергий ниже 0,5 Мэв, что проявилось в уменьшении длины релаксации тепловых нейтронов в два раза по сравнению с длиной релаксации в безводородной среде. Из сопоставления данных табл. 1 и 2 видно, что водородсодержащая железорудная защита обладает сравнительно высоким ослаблением всего спектра нейтронов реактора. К сожалению, ее водный компонент так же неустоек при высоких температурах, как и в других защитах. Можно попытаться вводить в материал защиты, по крайней мере в ее внешнюю часть, более стойкие добавки, такие, как гидриды металлов, серпентин и т. д.

Авторы хотят выразить благодарность А. И. Лейпунскому, О. Д. Казачковскому за постоянный интерес к работе; М. Я. Кулаковскому за полезные советы и участие в обсуждении результатов; Ю. А. Анохину за помощь в проведении экспериментальных работ.

Поступило в Редакцию 7/III 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Лейпунский и др. «Атомная энергия», 5, 277 (1958).
2. В. П. Машкович, С. Г. Цыпин. Там же, 11, 251 (1961).
3. А. И. Лейпунский и др. Там же, 11, 498 (1961).
4. С. Г. Цыпин. Там же, 12, 300 (1962).
5. G. Hurst. Brit. J. Radiol., 27, 353 (1954).
6. В. К. Даруга и др. См. настоящий выпуск, стр. 60.
7. В. П. Машкович. В сб. «Вопросы физики защиты реакторов». Под ред. Д. Л. Бродера и др. М., Госатомиздат, 1963, стр. 277.
8. В. П. Машкович и др. См. настоящий выпуск, стр. 65.
9. Б. И. Синицын, С. Г. Цыпин. «Атомная энергия», 12, 306 (1962).
10. R. MacDonald, H. Daucourt. Nucleonics, 208, 158 (1962).

УДК 621.039.538/539.125.52

Ослабление потоков нейтронов деления в железо-водных смесях

В. П. Машкович, А. Н. Николаев, Б. И. Синицын, С. Г. Цыпин]

Известно, что железо хорошо замедляет быстрые нейтроны, но плохо ослабляет нейтроны промежуточных энергий [1—4]. Известно также, что добавление к железу не менее 30 об.% воды делает защиту одинаково эффективной по отношению к быстрым, промежуточным и тепловым нейтронам $P_0 - \alpha - \beta$ -источника и источника моноэнергетических нейтронов с энергией 4 и 14,9 Мэв [5]. Интересно изучить ослабление потоков нейтронов и прежде всего нейтронов деления в железо-водных защитах, содержащих более 75 об.% железа.

В настоящей работе изучалось ослабление быстрых, тепловых и промежуточных нейтронов в железо-водных смесях при концентрациях железа более 75 об.%. Измерения проводились на установке Б-2 реактора БР-5 [6] для исследования защиты [7]. Источник нейтронов представлял собой дисковый мононаправленный источник с большим углом коллимации около 5°. Спектр быстрых нейтронов измерялся фотоэмульсионными [1]. Было установлено, что он в пределах ошибок измерений совпадает со спектром нейтронов деления при энергиях