

Таблица 2

Значения теплопроводности гелия [$\lambda \cdot 10^6$ кал/(см·сек·°С)] для равных интервалов температур и давлений

Интервал давлений, атм	Интервал температур, °С										
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1	341,9	426,8	506,7	581,8	652,9	720,4	784,4	846,8	906,7	964,3	1022,6
100	351,1	435,6	514,6	588,5	658,5	724,7	788,0	849,3	908,8	966,3	1024,7
200	360,3	444,4	522,5	595,2	664,0	729,0	791,1	851,9	910,8	968,2	1026,7

Коэффициенты этого уравнения определены по методу наименьших квадратов на основании опытов, проведенных в настоящей работе и наиболее надежных экспериментальных данных различных авторов работ [2—4] и [6] с учетом поправки на скачок температуры.

Отклонение экспериментальных точек от значений, рассчитанных по уравнению (7), не превышает 2%. На рис. 2 сплошная линия соответствует величинам теплопроводности гелия, определенным по уравнению (7). Это уравнение можно использовать для определения теплопроводности гелия при $p=1$ атм и для $t = 0 \div 1000^\circ \text{C}$.

Что касается работы Блейса и Манна [7], то их опыты проводились начиная с $t \approx 1000^\circ \text{C}$, тогда как в наших опытах верхний предел температур несколько ниже 1000°C . При 1000°C расхождения составляют 2,5% и находятся в пределах точности опытов этих авторов.

Поступило в Редакцию 21/XII 1964 г.
В окончательной редакции 14/V 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Kannuliik, E. Salmann. Proc. Phys. Soc., 65B, 701 (1952).

2. Л. С. Зайцева. ЖТФ, 29, 497 (1959).
3. W. Leidenfrost. Intern. J. Heat and Mass Transfer, 7, No. 4 (1964).
4. E. Comings, J. Lenoir. Chem. Engng Prog., 47, 223 (1951).
5. Н. В. Цедерберг, В. Н. Попов, Н. А. Морозова. Теплофизические свойства гелия. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961, стр. 45.
6. P. Johannin, M. Wilson, B. Vodar. Second Symposium on Thermophysical Properties, sponsored by ASME, 24—26 January, 1962, Academic Press, New York, 1962, p. 418.
7. N. Blais, J. Mann. J. Chem. Phys., 32, 1459 (1960).
8. Н. Б. Варгафтик, Н. Х. Зиминая. «Теплофизика высоких температур», 2, 716 (1964).
9. Д. Л. Тимрот, Н. Б. Варгафтик. «Изв. Всесоюз. теплотехн. ин-та», № 9, -1 (1935).
10. Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд. Молекулярная теория газов и жидкостей. М., Изд-во иностр. лит., 1961, стр. 497.
11. M. Wilson. Jr. O.T.S. Dept of Comm. Ga 1355, January 1960.
12. A. Rothman. Thermal Conductivity of Gases at High Temperatures. United States Atomic Commission, January 1954.

УДК 621.039.538.7

Защитные параметры бетонов

Л. Н. Зайцев, П. А. Лавданский, В. В. Мальков, Б. С. Сычев

Химический состав основных материалов, используемых в качестве заполнителей для бетонов, а также некоторые защитные параметры для этих материалов даны в табл. 1 [1—4]. Большая часть из приведенных материалов имеет одинаковый массовый коэффициент ослабления γ -излучения (табл. 2). Однако некоторые материалы, обладающие высокой концентрацией водорода, бора, железа и бария, не подчиняются указанной закономерности, поэтому они выделены отдельно.

Защитные параметры отдельных элементов для нейтронов спектра деления и γ -излучения с энергией до 10 Мэв взяты из работ [4—7]. Коэффициент ослабления γ -излучения высоких энергий принимался рав-

ным $\mu_{\text{мин}}$ [5]. В работе [8] для расчета ослабления потоков нейтронов с энергиями выше 10 Мэв используются приближенные выражения микроскопических сечений выведения для отдельных элементов:

$$\sigma_{rem}(E) = \sigma_{in}(E) + \frac{3}{E} \sigma_s(E) \text{ при } 10 < E < 50 \text{ Мэв; (1)}$$

$$\sigma_{rem}(E) = \sigma_{in}(E) \text{ при } 50 < E < 100 \text{ Мэв. (2)}$$

Некоторые данные по сечениям взаимодействия нейтронов с ядрами взяты из работы [9, 10]. Недостающие значения сечений взаимодействия для элементов, входящих в состав бетонов, получены интерполяцией.

Химический состав и некоторые защитные параметры материалов

Номер	Материал	Содержание кислорода и водорода в воде, кг/м ³		Содержание других элементов, кг/м ³											Нейтронные и у-излучение высокими энергий		Быстрые нейтроны спектра деления, Σ_{rem} , $\times 10^3$		Тепловые нейтроны	
		Плотность, кг/м ³	Н	О	В	С	О	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Σ_{fn} , $\times 10^4$	Σ_{th} , $\times 10^3$	Σ_{a1} , $\times 10^3$	Σ_{t0} , $\times 10^2$		
1	Вода	1000	111	889	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14,3	1,64	9,96	2,19	26,95	
2	Слепки и расплавы бортовой руды	1900	—	308	260	19	948	278	125	22	—	—	—	—	—	—	2,84	1010	1	
3	Боросодержащий шлам	2170	39	420	31	—	745	—	22	340	—	249	—	—	—	—	3,12	61	5,5	
4	Гипс	2300	52	—	—	—	856	—	—	431	—	538	—	—	10,1	1,99	4,40	0,77	6,5	
5	Боросодержащий шлам марки МНБ	2370	1	40	113	—	1282	21	558	328	2	39	—	—	—	—	3,56	199	1,22	
6	Боросодержащий шлам марки МБ	2370	—	—	79	—	1128	7	536	570	—	40	—	—	—	—	3,44	140	1,40	
7	Обычный шлам	2390	—	—	—	—	1250	4	362	720	4	42	—	—	9,4	1,95	3,26	0,21	1,06	
8	Известняк	2400	—	—	—	253	1175	14	11	22	3	909	—	—	9,2	2,03	3,16	0,31	1,72	
9	Андезит	2500	2	20	—	—	1175	186	265	690	—	21	—	—	9,33	1,99	3,08	0,34	1,26	
10	Мрамор	2500	4	33	—	301	1199	30	127	783	13	946	—	—	9,27	2,04	3,26	0,29	1,98	
11	Гранит	2500	8	64	—	—	1176	33	427	35	—	139	—	—	9,34	2,02	3,28	0,39	1,10	
12	Борат кальция	2500	72	578	306	—	848	—	—	—	—	628	—	—	—	—	5,40	513	8,10	
13	Карбид бора	2519	—	—	2172	347	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,20	3612	2,05	
14	Колеманит	2560	76	638	364	—	988	—	—	—	—	493	—	—	—	—	5,32	596	8,40	
15	Магнезитовый цемент	2580	39	312	—	—	893	1195	33	31	6	69	—	—	10,2	1,87	3,99	0,40	4,70	
16	Кварцевый песок	2600	—	—	—	—	1382	—	27	1173	18	—	—	—	9,4	1,94	3,48	0,138	1,01	
17	Серпентин	2620	32	256	—	—	1085	630	68	556	4	57	—	—	9,97	1,89	3,86	0,354	3,94	
18	Датолит	2790	38	304	413	—	1103	16	68	488	—	638	—	—	—	—	3,94	170	4,61	
19	Гипсоглиноземистый цемент	2920	18	147	—	—	1146	12	422	140	72	885	—	—	9,26	2,12	3,34	0,50	2,65	
20	Боросодержащий цемент	2950	5	43	34	—	946	38	88	344	18	1375	—	—	—	—	2,88	48,7	1,64	
21	Глиноземистый цемент	3000	—	—	—	—	1146	20	580	124	26	968	—	—	8,89	2,17	2,89	0,45	1,16	
22	Диабаз	3000	2	20	—	—	1322	210	270	685	—	45	—	—	9,16	1,99	3,09	0,45	1,15	
23	Базальт	3000	2	20	—	—	1369	183	291	758	—	36	—	—	9,25	2,02	3,43	0,34	1,08	
24	Портландцемент	3080	3	27	—	—	1129	34	68	395	31	1309	—	—	8,83	1,95	2,78	0,43	1,50	
25	Лимонит	3120	36	288	—	—	888	6	74	255	—	16	—	—	8,88	2,4	3,46	1,68	3,89	
26	Хромит	3520	17	137	—	—	1435	359	264	193	8	78	—	—	9,24	2,2	3,34	1,09	2,21	
27	Гематит	3980	—	—	—	—	1305	71	—	210	—	72	—	—	8,22	2,51	2,69	1,64	1,30	
28	Баритовая руда	4200	2	19	—	—	1184	—	—	88	516	—	—	—	7,32	2,85	2,33	0,50	0,84	
29	Металлургический скрап	4700	—	—	—	—	1466	19	—	102	—	16	—	—	8,08	2,57	2,43	2,30	1,30	
30	Сталь	7800	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,70	3	2,14	2,70	1,20	

* Содержание хрома.
 ** Содержание бария.
 *** Для $E_n \geq 100$ Мэв.

Таблица 2

Массовый коэффициент ослабления γ -излучения ($\times 10^3, \text{м}^2/\text{кг}$)

Материал	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	Энергия γ -излучений, Мэв					
		1	2	3	4	6	8
Вода	1000	7,06	4,93	3,96	3,39	2,76	2,41
Боратовая руда . .	1900	6,25	4,37	3,54	3,07	2,57	2,30
Карбид бора	2520	6,05	4,28	3,56	2,84	2,21	2,00
Барит	4200	6,04	4,28	3,69	3,42	3,22	3,18
Сталь	7800	5,95	4,24	3,61	3,30	3,04	2,95
Другие материалы, приведенные в табл. 1		6,35	4,45	3,63	3,17	2,68	2,43

В работе [11] предложена эмпирическая формула, показывающая зависимость сечения неупругого взаимодействия нейтронов от атомного веса элемента:

$$\sigma_{in} = 32A^{3/4}. \quad (3)$$

В табл. 3 приведены значения макроскопических сечений выведения нейтронов для элементов, входящих в состав бетонов. Эти значения вычислены по формулам (1) — (3).

Рис. 1. Номограмма для расчета сечений выведения быстрых нейтронов в бетонах (м^{-1}):

1 — изменение $\Sigma_{\text{вст}}$ в зависимости от содержания воды в бетонах при постоянной плотности; 2 — то же при изменении плотности; 3 — баритовый бетон; 4 — хромитовый бетон плотностью $3460 \text{ кг}/\text{м}^3$.

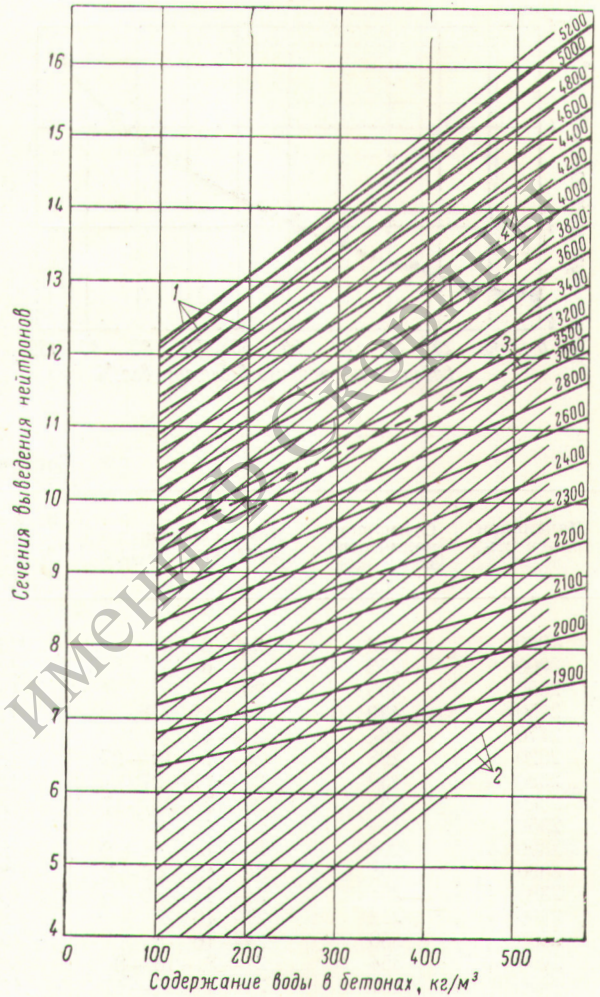


Таблица 3

Сечения выведения нейтронов ($\times 10^3, \text{м}^2/\text{кг}$)

Элемент	Энергия нейтронов, Мэв												
	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	100
H	56,5	3,84	28,8	28,8	18,6	15,6	13,2	10,2	8,1	6,9	6,0	5,4	4,8
C	3,0	3,6	2,6	2,75	2,4	2,15	1,90	1,55	1,25	1,10	1,05	1,0	1,0
O	3,04	4,57	3,7	3,29	2,74	2,75	2,10	1,84	1,50	1,32	1,20	1,15	1,01
Mg	2,95	2,62	2,38	2,15	1,90	1,75	1,62	1,42	1,20	1,12	1,02	0,95	0,92
Al	2,33	2,27	2,02	1,78	1,71	1,60	1,51	1,35	1,16	1,09	0,99	0,95	0,88
Si	2,76	2,87	3,06	2,42	2,20	1,97	1,80	1,55	1,26	1,11	1,03	0,96	0,87
S	2,64	2,44	2,0	2,04	1,82	1,75	1,63	1,41	1,16	1,03	0,96	0,88	0,84
Ca	2,43	2,55	2,35	2,14	1,98	1,72	1,59	1,38	1,11	0,99	0,93	0,82	0,78
Cr	2,09	1,75	1,56	1,42	1,35	1,23	1,18	1,05	0,92	0,85	0,81	0,76	0,74
Fe	2,04	1,70	1,55	1,42	1,36	1,22	1,19	1,05	0,88	0,84	0,77	0,73	0,71
Ba	1,28	1,06	0,92	0,84	0,77	0,72	0,69	0,64	0,58	0,57	0,55	0,55	0,55

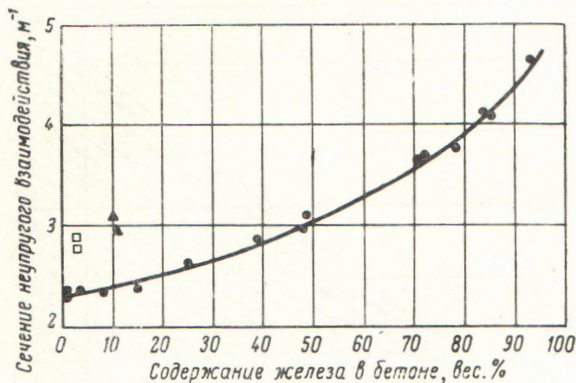


Рис. 2. Зависимость сечения неупругого взаимодействия сверхбыстрых нейтронов от содержания железа в бетонах:

□ — баритовые бетоны; ▲ — хромитовые бетоны; ● — бетоны на железной руде или стальном скрапе.

Комбинацией материалов можно получить бетоны постоянной плотности, но с различным содержанием воды [12—14]. Сечения выведения быстрых нейтронов спектра деления для таких бетонов изменяются в соответствии с прямыми 1, приведенными на рис. 1; прямые 3 характеризуют уменьшение сечений выведения нейтронов в зависимости от потери воды бетонами.

Таблица 4

Состав бетонов

Начальная плотность, кг/м ³	Суммарное количество воды, кг *	Номера материалов, взятых из табл. 1	Вода затворения, % от плотности бетона	Количество материалов, вес. % от плотности бетона	Содержание бора в бетоне, кг	Содержание железа в бетоне, кг
2000	253	24+6+5	12,5	15,7+67,1+4,7	43,3	31,6
2000	253	24+6+5	12,5	15,7+54,0+17,8	59,7	13,7
2050	295	20+5	13,9	19,0+67,1	70,5	17,6
2150	429	24+17	11,3	10,7+78,0	—	6,1
2170	564	24+4	10,8	14,0+75,2	—	9,3
2320	298	24+7+13+27	12,6	12,9+47,7+1,0+25,8	20,7	372,4
2330	430	24+17+27	13,0	13,0+47,7+26,3	—	363,1
2340	430	24+7+26+17	12,6	12,8+12,8+26,0+35,8	—	89,9
2350	134	24+16+8	5,6	9,4+28,9+56,1	—	11,6
2390	206	24+13+16+8	8,6	12,3+3,4+28,6+47,1	70,8	12,3
2390	208	24+13+16+8	8,6	12,3+1,7+30,3+47,1	35,4	12,3
2390	291	24+12+16+8	10,5	8,4+6,2+27,2+47,5	18,0	12,1
2400	212	21+16+8	8,8	12,7+25,8+52,7	—	19,0
2400	250	24+16+8	10,4	18,7+18,8+52,1	—	17,3
2400	354	24+3+16+8	12,8	6,1+12,1+17,5+51,5	4,1	23,1
2420	401	24+7+27+17	12,4	12,7+12,7+25,7+36,5	—	374,4
2430	510	24+18	12,2	17,5+70,3	69,0	43,1
2700	478	24+25	8,9	11,1+80,0	—	1074,0
2770	406	24+4+27	6,5	12,7+39,2+41,6	—	684,3
3270	186	24+16+27	5,6	9,2+19,2+66,0	—	1275,0
3300	232	24+14+28	5,6	14,7+7,3+72,4	33,6	111,0
3340	208	24+14+27	5,4	11,4+6,6+76,6	30,8	1504,0
3370	312	19+25+27	6,5	8,9+21,4+63,2	—	1623,0
3460	500	24+26	11,3	10,1+78,6	—	387,5
3540	341	19+28	8,5	13,5+78,0	—	120,1
3550	219	24+28	5,6	9,8+84,6	—	119,2
3630	335	15+27	8,5	11,3+80,2	—	1707,0
3660	183	24+27	4,9	8,2+86,9	—	1795,0
4300	183	24+16+27+30	4,2	8,1+9,3+16,3+62,1	—	3087,0
4440	416	19+25+30	5,1	5,0+38,8+51,1	—	3126,0
4650	186	24+16+30	3,9	6,4+10,9+78,8	—	3698,0
4730	356	19+25+30	5,7	6,3+14,0+74,0	—	3837,0
5080	191	24+14+30	3,2	5,3+4,5+87,0	32,2	2921,2
5290	332	19+30	5,7	10,8+83,7	—	4435,0
5350	262	24+30	4,8	10,6+84,6	—	4535,0
6310	133	24+30	2,1	4,6+93,3	—	5890,0

* Учитывается химически связанная вода в материалах и вода затворения.

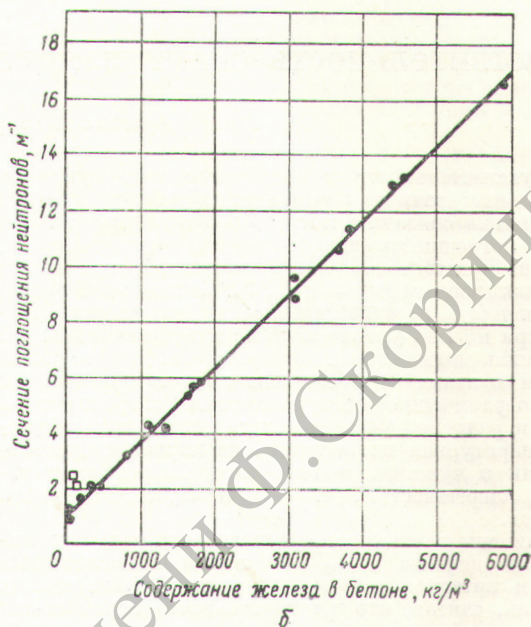
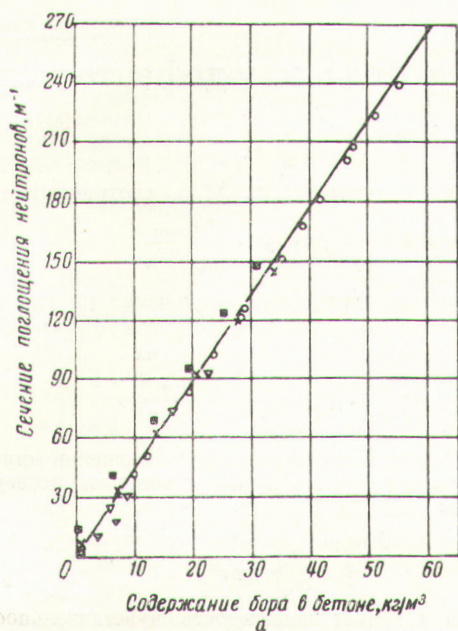


Рис. 3. Зависимость сечений поглощения тепловых нейтронов от содержания в бетонах бора (а) и железа (б), $\text{кг}/\text{м}^3$:

○ — 2000; ▽ — 2300; × — 3300; ■ — 5080; □ — баритовый бетон; ● — бетоны на железной руде или стальном скрапе.

На рис. 2 показана зависимость Σ_{in} нейтронов ($E > 100 \text{ Мэв}$) от количества железа в бетонах; на рис. 3 — зависимость сечения поглощения тепловых нейтронов от количества бора и железа в бетонах. Точки на рисунках соответствуют составам бетонов, приведенных в табл. 4. Кроме того, были использованы составы бетонов из работ [1, 4, 5, 13].

Поступило в Редакцию 20/VII 1964 г.
В окончательной редакции 4/V 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Комаровский. Строительство ядерных установок. М., Госэнергоиздат, 1961.
2. И. А. Аршинов. В сб. «Вопросы физики защиты реакторов». М., Госатомиздат, 1963.
3. К. Д. Некрасов. Жаростойкий бетон. М., Промстройиздат, 1957.
4. Reactor Handbook. Vol. III, Part B. N. Y.— London, 1962.

5. Б. Прайс и др. Защита от ядерных излучений. Перев. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
6. L. Richard. Nucleonics, 20, No. 8, 141 (1962).
7. G. Lindakers. Atomkernenergie, H. 7/8, 272 (1961); H. 10, 379 (1961).
8. Von H. J. Langmann. Nukleonik, 3, 201 (1961).
9. Дж. Юз., Р. Шварц. Атлас нейтронных сечений. Изд. 2. М., Атомиздат, 1959.
10. И. В. Гордеев и др. Ядерно-физические константы. М., Госатомиздат, 1963.
11. М. М. Комочков. Препринт ОИЯИ, P-1349, 1963.
12. Д. Л. Бродер и др. «Атомная энергия», 16, 26 (1964).
13. Л. Н. Зайцев и др. «Бетон и железобетон», № 1, 8 (1964).
14. Л. Н. Зайцев, М. М. Комочков. «Труды Московского инженерно-строительного института», № 41, 33 (1962).