

ТЕМА 2.5 ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ ОТ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С УЧЕТОМ РАССЕЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Защита временем, количеством, расстоянием

Допустимые условия работы с источниками излучения требуют, чтобы выполнялись условия, накладываемые основными пределами доз. Так, согласно Гигиеническому нормативу «Критерии оценки радиационного воздействия», для персонала среднегодовая эффективная доза E не должна превышать 20 мЗв, среднегодовая эквивалентная H доза на хрусталик – 20 мЗв, а на кожу, кисти, стопы – 500 мЗв. Соответственные среднегодовые дозовые пределы, накладываемые на техногенное облучение для населения, составляют 1 мЗв, 15 мЗв и 150 мЗв.

Поскольку годовое накопление дозы ограничивается для персонала рабочим временем в количестве 1700 ч (для населения время облучения составляет 8800 ч), удобно в качестве лимитированной величины вводить не только сами предельно допустимые дозы (ПДД), но и допустимую мощность дозы (ДМД). Например:

$$\begin{aligned} H(r) &\leq \text{ПДД} \\ \dot{H}(r) &\leq \text{ДМД} \end{aligned} \quad (2.5.1)$$

Здесь r – расстояние от источника до рабочего места, $\dot{H}(r)$ и $H(r)$ – мощность эквивалентной дозы на рабочем месте и сама эквивалентная доза, которую получает персонал за определенное время работы t с источниками ионизирующего излучения.

Отметим, что согласно Гигиеническому нормативу «Критерии оценки радиационного воздействия» ДМД для персонала при проектировании помещений постоянного пребывания составляет 6 мкЗв/ч, а для помещений временного пребывания – 12 мкЗв/ч. Данные значения получены с учетом двукратного запаса на внутреннее облучение персонала вследствие ингаляционного поступления радионуклидов.

Для случая, когда точечный радионуклидный гамма-источник с постоянной активностью A расположен на расстоянии r от незащищенного рабочего места, пренебрегая рассеянным в воздухе излучением и мощность эквивалентной дозы и саму дозу, согласно (2.1.24) и (2.3.20), можно выразить как:

$$\begin{aligned}\dot{H}(r) &= 1,09 \frac{A \cdot \Gamma_D}{r^2} \\ H(r) &= 1,09 \frac{A \cdot \Gamma_D}{r^2} t\end{aligned}\quad (2.5.2)$$

где Γ_D - энергетическая гамма-постоянная конкретного радионуклида.

Из формулы (2.5.2) следует, что при отсутствии защитного экрана можно добиться допустимых условий работы с источником излучения следующими способами защиты:

- **защита временем** - уменьшаем время работы с источником, чтобы не превышать ПДД, при заданных r и A ;
- **защита количеством** - уменьшаем массу, а соответственно и активность радионуклида A , при заданных ДМД (ПДД) и r ;
- **защита расстоянием** - увеличиваем расстояние до источника, при заданных ДМД (ПДД) и A .

Из (2.5.2) видно, что для *точечного источника* мощность дозы (интенсивность излучения) в данной точке пространства обратно пропорционально квадрату расстояния от источника – это так называемый **закон обратных квадратов**, основанный на геометрическом ослаблении излучения:

$$\dot{H} \sim \frac{1}{r^2}, \quad (2.5.3 \text{ а})$$

или

$$\frac{\dot{H}_2}{\dot{H}_1} = \left\{ \frac{A \Gamma_D}{4\pi r_2^2} \cdot \frac{4\pi r_1^2}{A \Gamma_D} \right\} = \frac{r_1^2}{r_2^2}. \quad (2.5.3 \text{ б})$$

Однако, большинство источников излучения - неточечные. Очень много линейных источников (трубопроводы, ТВЭЛы), имеются также крупные объемные источники типа радиоактивных емкостей и теплообменников. Для линейных источников и крупных источников, **мощность дозы уменьшается медленнее, пропорционально расстоянию r :**

$$\dot{H} \sim \frac{1}{r}, \quad (2.5.4)$$

Способы защиты временем, количеством и расстоянием, очевидно, имеют свои ограничения, поскольку в ряде случаев либо технологически неприемлемо изменение активности источника, либо требуется постоянное присутствие оператора на рабочем месте, расположение которого фиксировано. Таким образом, наиболее распространенным эффективным способом организации защиты остается применение защитных экранов.

Кратность ослабления

При расчете защиты от гамма-излучения удобно применять характеристику, названную кратностью ослабления излучения $K_{осл}$.

Кратность ослабления — это отношение дозовой величины без защиты на рабочем месте к предельно допустимой дозовой величине в той же точке:

$$K_{осл} = \frac{\dot{H}(r)}{ДМД}, \quad (2.5.5 \text{ а})$$

$$K_{осл} = \frac{H(r)}{ПДД}. \quad (2.5.5 \text{ б})$$

Таким образом, кратность ослабления показывает, во сколько раз нужно ослабить излучение для достижения допустимых значений.

Расчет защиты с помощью универсальных таблиц

При проектировании защиты чаще всего ставится задача определения толщины экрана d , которая обеспечит заданный уровень облучения. Но даже для точечного изотропного и моноэнергетического источника эту задачу решить нелегко.

Как отмечено выше, зависимость между мощностью дозы, толщиной защиты d и характеристиками источника с учетом рассеянного в защите излучения в данном случае дается выражением

$$\dot{H}(d) = 1,09 \frac{A \cdot \Gamma_D}{r^2} \exp[-\mu(E_0)d] \cdot B_D(E_0, \mu d), \quad (2.5.6)$$

которое можно записать в виде

$$\dot{H}(d) = \dot{H}_n(d) \cdot B_D = \dot{H}_0 \exp[-\mu d + \ln B_D] \quad (2.5.7)$$

где $\dot{H}_0 = 1,09 \frac{A \cdot \Gamma_D}{r^2}$ - мощность эквивалентной дозы на расстоянии r от источника в отсутствие защиты;

$\dot{H}_n(d) = \dot{H}_0 \exp(-\mu d)$ - мощность эквивалентной дозы за защитой без учета рассеянного излучения.

Уравнение (2.5.7) трансцендентное и в аналитическом виде не решается. – такие уравнения требуют решения либо численными методами, либо в графическом виде. Перепишем (2.5.7) в следующем виде

$$K_{осл} = K_{осл}(E_0 d) = \frac{\dot{H}_0}{\dot{H}(d)} = \exp[\mu d - \ln B_D] \quad (2.5.8)$$

Здесь $K_{осл}$ - кратность ослабления излучения, которая показывает, во сколько раз защитный экран из данного вещества толщиной d ослабляет полное (первичное и вторичное) фотонное излучение от источника с энергией E_0 .

Удобным для практического использования выражения (2.5.8) является использование таблиц зависимости толщины защиты d от кратности ослабления K для различных энергий E_0 , в которые внесены

данные, вычисленные на основании теории ослабления в веществе широкого пучка гамма-излучения от точечного источника.

Наибольшее распространение в практическом применении получили универсальные таблицы (универсальные таблицы Гусева) для расчета защиты от *фотонного излучения точечных изотропных моноэнергетических источников в бесконечной геометрии защиты*.

Условное название «универсальные» эти таблицы получили потому, что с их помощью можно определить:

- искомую толщину защиты по заданной кратности ослабления дозы (мощности дозы);
- дополнительную толщину защиты (или её избыток) к существующей толщине;
- толщину защиты по заданной активности или гамма-эквиваленту источника;
- кратность ослабления по заданной толщине или набору нескольких слоев защиты из различных материалов;
- линейные и массовые эквиваленты отдельных защитных материалов;
- толщину слоев половинного или десятикратного ослабления.

В таблицах 2.5.1 -2.5.4 Приложения приведены универсальные таблицы Гусева для нескольких материалов (вода, бетон, железо, свинец).

При определении по универсальным таблицам необходимой толщины защиты d (см) из данного материала следует знать энергию гамма-излучения E_0 , МэВ, и кратность ослабления в бесконечной геометрии $K_{осл}^{\infty}$.

Для определения по универсальным таблицам толщины защиты в барьерной геометрии при $\mu d \geq 2$ надо требуемую для барьерной геометрии кратность ослабления $K_{осл}^b$ умножить на поправку δ_b , которая учитывает отличие дозового фактора накопления в барьерной и

бесконечной геометриях, и уже для полученной кратности ослабления $K_{осл}^{\infty} = K_{осл}^{\delta} \cdot \delta_D$ определять толщину защиты по универсальным таблицам.

Значения δ_D приведены в табл. 2.5.5. Учёт барьерной геометрии больше влияет на толщину защиты для небольших энергий фотонов.

Расчет защиты с помощью номограмм

Зависимость кратности ослабления от толщины защиты, которая определяется выражением (2.5.8), можно представить и в графическом виде. Такие зависимости называются номограммами (универсальными номограммами). Номограммы можно построить и по экспериментальным данным. Например, если измерять в одинаковой геометрии мощность поглощенной дозы в воздухе без защиты $\dot{D}_0$ и за защитой толщиной d – $\dot{D}(d)$, то кратность ослабления $K_{осл}^{\delta}$ определяется по формуле

$$K_{осл}^{\delta} = \frac{\dot{D}_0}{\dot{D}(d)} \quad (2.5.9).$$

Подобным образом можно построить номограммы и для других характеристик поля излучения. Используют номограммы для определения толщины защиты от излучения конкретных радионуклидов и источников фотонов со сплошным спектром, от точечных и протяженных источников.

Номограммы, также как и универсальные таблицы, позволяют быстро и с хорошей точностью решать практические задачи проектирования защиты. На рис. 2.5.1-2.5.2 приведены построенные для кратности ослабления мощности дозы номограммы для определения толщины барьерной защиты из свинца и железа для гамма-излучения точечных изотропных источников Co-60 и Cs-137.

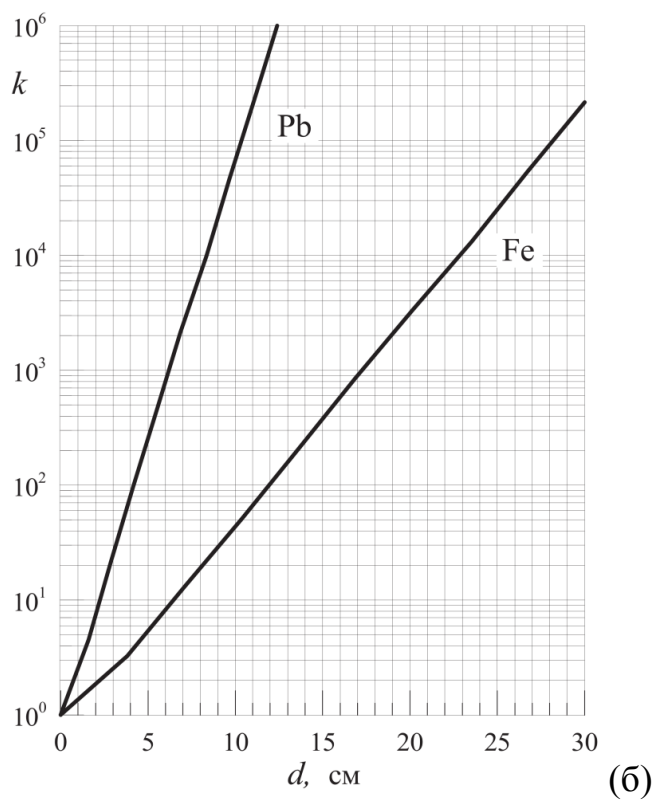
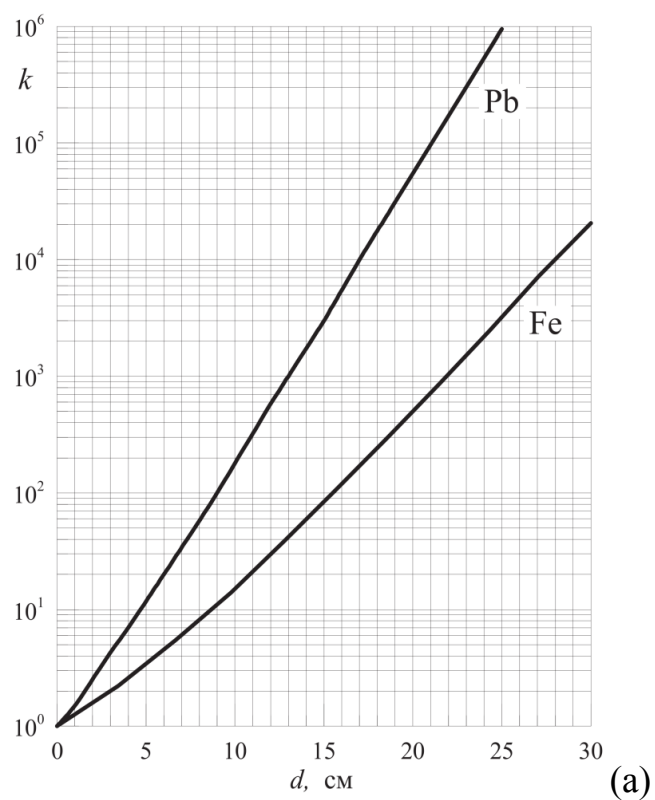


Рисунок 2.5.1 Номограммы для определения толщины барьерной защиты из свинца и железа для гамма-излучения точечных изотропных источников
(а) Co-60 и (б) Cs-137

Поскольку номограммы получены по экспериментальным данным в барьерной геометрии, они не требуют поправки на барьерность, и учитывают спектральный состав излучения. Если спектр радионуклида не является моноэнергетическим, то толщину защиты лучше определять по номограммам.

Расчет защиты от плоских и точечных изотропных источников по слоям ослабления

Слой ослабления $\Delta_{1/m}$ указывает толщину защиты, которая ослабляет дозу излучения (плотность потока, интенсивность и т. д.) в m раз. Наиболее широко в расчетах защиты от фотонного излучения применяют слои половинного $\Delta_{1/2}$ и десятикратного $\Delta_{1/10}$ ослабления.

Толщине защиты, равной слою половинного ослабления, соответствует кратность ослабления 2, а толщине, равной слою десятикратного ослабления соответствует кратность ослабления 10.

Если нам известна требуемая кратность ослабления поля излучения, например, мощности поглощённой дозы, то её можно представить в виде

$$K_{осл} = m^{\frac{d}{\Delta_{1/m}}}, \quad (2.5.10)$$

где d - необходимая толщина защиты, $m = 2$ (10). Из выражения (8.12) легко найти толщину защиты

$$d = \frac{\ln K_{осл} \cdot \Delta_{1/m}}{\ln m} \quad (2.5.11)$$

При расчетах защиты мы имеем дело с широким пучком излучения, спектр которого непрерывно меняется с изменением толщины. Следовательно, изменяются сечения взаимодействия и величина слоя ослабления.

Зависимость $\Delta_{1/2}$ для бетона и точечного изотропного источника ^{60}Co показана на рис. 2.5.2. Как следует из этого рисунка, для защиты

небольшой толщины (малые значения кратности ослабления $K_{осл.}$) значения $\Delta_{1/2}$ значительно выше, чем для защиты большей толщины. Это связано с более высокой средней энергией фотонов в первых слоях защиты (в основном здесь нерассеянное высокоэнергетическое излучение и мало рассеянного и вторичного излучения).

С увеличением толщины защиты значения $\Delta_{1/2}$ постепенно выходят на насыщение. Причиной этого является установление примерно постоянной (квазиравновесной) формы спектра рассеянного и вторичного излучения на больших толщинах защиты (более 3...4 длин свободного пробега).

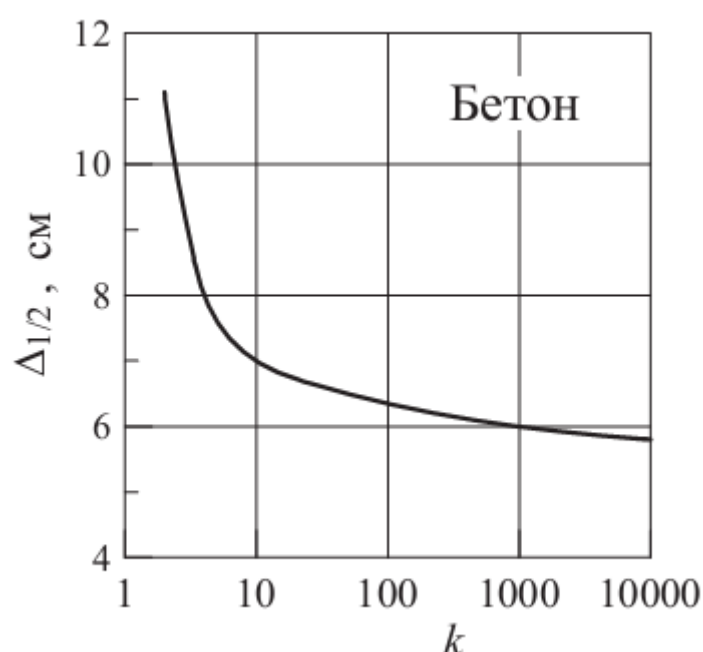


Рисунок 2.5.2 Зависимость толщины слоя половинного ослабления от кратности ослабления

Следует отметить, что всегда с увеличением толщины защиты величина $\Delta_{1/m}$ стремится к постоянному значению, но форма зависимости $\Delta_{1/m}(d)$ определяется следующими факторами:

- геометрией и угловым распределением источника;
- энергией источника;
- веществом защиты.

В связи с заметным изменением слоя ослабления с увеличением толщины защиты методика расчёта с использованием слоев половинного и десятикратного ослабления является приближённой. Как правило, она применяется для быстрых оценок. В практике расчётов защиты по слоям ослабления более часто используют слои десятикратного ослабления. При этом для повышения точности расчета учитывают зависимость $\Delta_{1/10}(d)$, используя два слоя десятикратного ослабления.

Первый ($\Delta_{1/10}$), значение которого соответствует началу защиты, и последующий ($\Delta_{1/10}^{ac}$ - асимптотический), величина которого соответствует большой толщине защиты. В этом случае толщина защиты d определяется следующим образом

$$d = \Delta_{1/10} + \frac{\ln K_{ocл}^1}{\ln 10} \cdot \Delta_{1/10}^{ac}, \quad (2.5.12)$$

где $K_{ocл}^1 = \frac{K_{ocл}}{10}$. Выделение первого слоя десятикратного ослабления заметно повышает точность расчета защиты методом слоев ослабления.

Значения слоев $\Delta_{1/10}$ и $\Delta_{1/10}^{ac}$ для различных материалов и энергий фотонов плоских моноэнергетических и изотропных источников имеются в справочниках в таблицах. Часть данных приведена в табл. 2.5.5. Если значения слоев ослабления имеются только для бесконечной среды, а находится толщина защиты в барьерной геометрии, то необходимо как и при использовании универсальных таблиц использовать поправку на барьерность $K_{ocл}^1 = K_{ocл}^{\bar{}} \cdot \delta_D$. Значения δ_D также можно взять из табл. 2.2.5.

Если необходимого вещества защиты в таблицах нет, то значения $\Delta_{1/10}$ и $\Delta_{1/10}^{ac}$ можно получить с помощью интерполяции значений для элементов с ближайшими атомными номерами.

Метод конкурирующих линий

Метод конкурирующих линий используется для расчета защиты от *немоноэнергетических* источников. Он позволяет проводить расчёт защиты для этих источников с помощью методов, разработанных для моноэнергетических источников, например, по универсальным таблицам или слоям ослабления.

Пусть имеется немонаэнергетический источник с дискретным набором энергий $E_1, E_2, \dots, E_m$ и соответствующим процентным вкладом каждой энергии $f_1, f_2, \dots, f_m$ в дозу (мощность дозы, гамма-эквивалент, интенсивность и т. д.).

Если спектр непрерывный, то его разбивают на несколько интервалов и определяют в каждом эффективную энергию $\bar{E}_i$. При этом необходимо избегать разделения спектра на большое количество энергетических интервалов и вместе с тем не объединять в один интервал энергии с существенно различными сечениями взаимодействий. В большинстве практических случаев бывает достаточно 3...5 интервалов. Удобно располагать энергии (эффективные энергии) в порядке их уменьшения, т. е. $E_1 > E_2 > \dots > E_m$, что соответствует уменьшению проникающей способности излучения.

Затем для каждой эффективной энергии $\bar{E}_i$ учёт её относительного вклада f_i определяют необходимую толщину защиты с помощью одного из методов для моноэнергетического излучения, рассмотренных ранее. При этом получаем набор значений толщины защиты: $d_1, d_2, \dots, d_m$.

Энергию фотонов, для которой требуется наибольшая толщина защиты, называют *главной линией* спектра. Толщину этой защиты обозначим d_2 . Энергию фотонов, для которой требуется следующая по величине (после главной) толщина защиты, называют *конкурирующей линией*. Эту толщину защиты обозначим d_k . Необходимая толщина защиты d определяется из соотношений

$$\begin{cases} d=d_{\Gamma}+\Delta_{1/2} & , \text{ если } d_{\Gamma} - d_{\text{К}} \ll \Delta_{1/2} \\ d=d_{\text{К}}+\Delta_{1/2} & , \text{ если } d_{\Gamma} - d_{\text{К}} < \Delta_{1/2} \\ d=d_{\Gamma} & , \text{ если } d_{\Gamma} - d_{\text{К}} > \Delta_{1/2} \end{cases} \quad (2.5.13)$$

где $\Delta_{1/2}$ - наибольшее значение слоя половинного ослабления, выбранное из найденных толщин половинного ослабления для главной и конкурирующей линий спектра.

Этот метод расчёта называется методом конкурирующих линий потому, что по мере увеличения толщины защиты главная и конкурирующая линии могут меняться местами или даже уступать место третьей линии, которая раньше была второстепенной.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблицы 2.5.1-2.5.4 Универсальные защитные таблицы Гусева для точечного источника гамма-излучения и бесконечной геометрии защиты из различных материалов (вода, бетон, железо, свинец) в приближении широких пучков

Толщина защиты из воды ($\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$) для различной кратности ослабления k γ -излучения (широкий пучок)

Кратность ослабления k	Толщина защиты, см, при энергии γ -излучения, МэВ																			
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	3	4	6	8	10
1,5	19	23	23	22	21	20	20	20	20	20	19	19	19	20	20	21	22	23	25	25
2	21	27	28	28	28	27	27	27	28	28	28	28	29	30	31	34	35	39	41	41
5	25	37	43	45	46	47	47	48	49	50	52	54	56	59	61	67	71	83	89	93
8	27	41	49	52	54	54	54	56	57	58	62	66	68	72	74	81	89	105	113	120
10	30	45	51	54	57	57	58	60	61	62	66	70	74	78	80	88	97	115	124	131
20	33	50	60	64	68	69	71	72	74	76	82	87	91	96	99	111	125	144	159	170
30	37	54	65	70	73	75	77	79	81	83	89	94	100	105	109	122	139	162	178	190
40	38	57	69	74	77	80	82	84	87	89	95	101	106	112	116	131	149	173	192	204
50	39	60	71	77	80	83	85	88	90	93	99	106	112	118	122	138	156	184	204	217
60	40	62	74	79	83	86	88	91	93	96	102	109	116	123	127	144	162	191	213	226
80	45	65	77	83	87	90	93	96	99	102	110	116	123	130	134	153	171	204	225	240
10^2	46	67	80	86	89	93	96	100	103	105	114	120	128	134	139	159	180	211	235	251
$2 \cdot 10^2$	48	73	87	94	99	103	107	111	115	118	127	135	143	152	157	179	204	242	268	285
$5 \cdot 10^2$	52	83	97	104	110	115	120	124	129	133	145	155	164	173	180	207	236	278	310	330
10^3	58	89	105	113	119	125	131	136	141	145	157	168	178	188	195	225	257	305	343	366
$2 \cdot 10^3$	63	95	112	120	128	134	140	146	152	156	170	182	193	204	212	245	280	330	372	398
$5 \cdot 10^3$	68	102	121	131	140	146	153	160	165	171	185	199	212	224	234	271	308	368	413	443
10^4	74	109	129	139	148	155	162	169	177	183	198	213	227	241	251	290	330	393	444	477
$2 \cdot 10^4$	80	114	135	147	157	165	172	180	187	194	211	227	243	258	270	311	354	420	475	511
$5 \cdot 10^4$	82	121	144	157	168	177	185	193	201	208	227	244	261	277	290	334	383	457	516	556
10^5	88	126	150	164	176	185	194	203	211	220	240	259	276	294	306	353	404	484	547	590
$2 \cdot 10^5$	90	133	157	172	184	194	203	213	221	231	252	272	290	308	322	372	426	511	578	622
$5 \cdot 10^5$	97	140	166	182	195	205	216	226	235	246	268	289	310	329	343	380	454	543	616	665
10^6	102	146	172	189	203	213	224	234	245	254	279	302	324	345	360	417	478	597	649	701
$2 \cdot 10^6$	110	153	179	195	211	221	232	242	252	262	287	310	334	357	373	435	498	597	677	733
$5 \cdot 10^6$	120	160	187	205	221	234	247	258	270	281	308	333	357	379	397	462	528	633	719	778
10^7	129	167	193	212	229	242	256	269	280	292	318	345	370	393	411	480	549	659	748	810

Толщина защиты из бетона ($\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$) для различной кратности ослабления k γ -излучения (широкий пучок)

Крат- ность ослабе- ния k	Толщина защиты, см, при энергии γ -излучения, МэВ																			
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	3	4	6	8	10
1,5	2,6	4,7	6,3	7,5	8,2	8,2	8,2	8,3	8,3	8,5	8,6	8,7	8,7	8,8	8,9	9,4	10,0	11,7	11,7	11,7
2	4,7	7,6	9,9	11,3	12,3	12,4	12,4	12,6	12,7	12,9	13,3	13,6	13,8	14,1	14,3	15,3	16,4	18,8	18,8	18,8
5	5,6	11,0	15,5	18,8	21,1	21,8	22,3	22,6	23,0	23,5	24,6	25,8	27,0	28,2	29,4	32,9	35,2	38,7	39,3	39,9
8	7,0	12,9	17,8	22,0	24,6	25,6	26,4	27,2	27,9	28,8	30,5	32,2	33,8	35,2	36,4	39,9	43,4	48,1	48,7	49,3
10	8,2	14,6	19,7	23,7	25,8	26,8	27,6	28,4	29,1	29,9	31,9	34,0	35,9	37,6	39,0	43,4	47,5	51,6	52,8	54,0
20	8,2	15,3	21,4	25,8	29,9	31,9	33,6	35,0	36,2	37,0	39,9	42,5	44,8	47,0	48,6	54,0	58,7	64,6	65,7	69,3
30	8,5	16,4	22,8	27,7	32,9	34,8	36,4	37,8	39,2	40,5	43,7	46,5	49,3	51,6	53,5	59,9	65,7	71,6	72,8	78,1
40	8,5	17,6	24,2	29,6	34,0	36,2	37,9	39,6	41,3	42,8	45,3	49,8	52,8	55,2	57,3	64,0	69,8	77,5	79,2	84,5
50	9,9	18,8	25,1	30,8	35,0	37,6	39,4	41,2	42,8	44,6	48,5	52,1	55,2	58,1	60,1	66,9	72,8	81,6	83,9	89,8
60	11,0	20,0	26,1	31,7	36,4	38,5	40,5	42,5	44,1	45,8	50,1	54,0	57,5	60,5	62,7	69,8	74,0	85,1	88,0	93,9
80	11,5	20,4	27,7	33,6	38,7	41,1	43,0	44,8	46,5	48,1	52,4	56,4	59,9	63,4	65,7	74,0	81,0	90,4	93,9	100,4
100	11,5	21,1	28,9	35,2	39,9	43,0	45,3	47,2	48,8	50,5	54,5	58,3	62,2	65,7	68,6	77,5	84,5	95,1	98,0	105,1
$2 \cdot 10^2$	12,7	23,5	32,4	39,2	44,6	47,9	50,5	52,6	54,6	56,4	60,8	65,3	69,7	74,0	77,2	88,0	95,7	108,0	112,1	120,9
$5 \cdot 10^2$	13,8	24,6	35,2	43,9	50,5	54,5	57,3	58,8	62,5	64,6	69,8	74,8	79,8	84,5	88,5	101,0	110,4	124,4	129,7	139,7
10^3	15,5	28,2	39,2	48,1	55,2	59,2	62,5	65,3	67,8	70,4	76,1	81,7	87,6	92,7	97,0	110,9	120,9	137,9	143,2	155,0
$2 \cdot 10^3$	17,6	30,5	42,3	52,4	59,9	64,1	67,4	70,4	73,2	75,7	82,2	88,5	94,6	100,4	104,0	120,9	132,1	150,3	156,1	168,5
$5 \cdot 10^3$	18,8	33,1	45,6	56,4	65,7	70,0	74,0	77,0	80,2	82,8	90,2	97,4	104,2	110,9	115,5	132,7	146,8	166,7	173,8	186,7
10^4	18,8	35,2	48,5	60,3	69,3	74,7	79,1	82,9	86,2	89,2	97,2	104,5	111,5	118,6	124,7	143,2	156,7	179,0	187,8	201,3
$2 \cdot 10^4$	21,1	38,4	51,9	63,4	72,8	78,2	83,1	87,3	91,1	94,5	102,7	110,8	118,6	126,2	131,7	152,6	167,3	190,8	201,9	216,0
$5 \cdot 10^4$	23,3	42,3	56,4	68,6	78,1	83,4	88,7	93,4	97,9	102,1	111,5	120,4	128,4	136,2	142,0	164,9	181,4	206,6	218,4	233,6
10^5	30,5	50,5	64,6	75,1	82,8	88,3	93,5	98,1	102,5	106,8	116,9	126,6	135,7	144,4	150,7	173,8	191,4	218,4	231,3	248,9
$2 \cdot 10^5$	38,3	56,7	69,8	79,4	86,9	92,4	97,7	102,8	108,0	112,7	125,1	135,6	145,1	153,8	160,2	177,3	201,9	231,3	245,5	263,0
$5 \cdot 10^5$	44,8	61,5	73,7	83,7	91,6	98,1	103,9	109,5	114,8	119,7	133,8	142,5	152,6	162,0	169,2	196,0	214,8	247,1	261,8	281,2
10^6	49,3	66,4	79,8	89,8	97,4	103,7	109,2	114,1	119,5	124,4	140,2	149,8	160,6	171,4	178,6	205,4	225,4	260,6	274,7	295,8

Толщина защиты из железа ($\rho = 7,89 \text{ г/см}^3$) для различной кратности ослабления k γ -излучения (широкий пучок)

Кратность ослабления k	Толщина защиты, см, при энергии γ -излучения, МэВ																			
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	3	4	6	8	10
1,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,6	1,7	1,85	2,0	2,05	2,1	2,15	2,2	2,3	2,4	2,5	2,7	2,8	2,9	2,4	2,0
2	0,7	1,2	1,7	2,2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,3	3,45	3,6	3,8	3,9	4,1	4,4	4,5	4,6	4,0	3,4
5	1,4	2,5	3,4	4,1	4,8	5,1	5,5	5,7	6,1	6,4	6,9	7,4	7,8	8,1	8,3	8,9	9,4	9,6	9,0	8,0
8	1,7	3,1	4,2	5,1	5,8	6,3	6,7	7,1	7,5	7,8	8,5	9,1	9,6	10,1	10,3	11,2	11,6	12,1	11,2	10,4
10	1,9	3,5	4,6	5,6	6,3	6,8	7,3	7,7	8,1	8,5	9,3	10,0	10,6	11,0	11,4	12,2	12,6	13,2	12,4	11,4
20	2,3	4,3	5,7	6,8	7,7	8,3	8,8	9,4	9,8	10,3	11,3	12,2	13,0	13,6	14,1	15,3	15,9	16,6	16,0	15,0
30	2,4	4,5	6,2	7,5	8,5	9,2	9,8	10,4	10,9	11,4	12,6	13,6	14,4	15,1	15,6	17,0	17,7	18,8	18,0	17,0
40	2,5	4,8	6,6	8,0	9,1	9,8	10,5	11,1	11,7	12,2	13,3	14,4	15,3	16,1	16,6	18,2	19,1	20,4	19,4	18,4
50	2,9	5,2	7,1	8,4	9,5	10,3	11,0	11,6	12,2	12,7	13,9	15,1	16,1	16,9	17,5	19,1	20,0	21,5	20,6	19,6
60	3,1	5,6	7,5	8,8	9,8	10,7	11,4	12,1	12,7	13,2	14,5	15,7	16,7	17,6	18,2	19,9	21,0	22,4	21,4	20,6
80	3,2	5,9	7,7	9,2	10,4	11,2	12,0	12,7	13,4	14,0	15,5	16,3	17,8	18,7	19,4	21,2	22,2	24,0	23,0	22,0
100	3,4	6,1	8,1	9,6	10,8	11,7	12,5	13,2	13,9	14,5	16,1	17,3	18,5	19,5	20,2	22,1	23,3	25,0	24,0	23,1
$2 \cdot 10^2$	4,2	7,0	9,1	10,7	12,0	13,1	14,0	14,8	15,6	16,3	18,0	19,6	20,8	22,0	22,8	25,0	26,6	28,4	27,4	26,6
$5 \cdot 10^2$	4,4	7,7	10,1	12,0	13,7	14,9	16,0	17,0	17,9	18,7	20,6	22,3	23,7	25,0	25,9	28,8	30,6	32,7	32,0	31,2
10^3	4,5	8,2	11,0	13,2	15,0	16,3	17,5	18,6	19,6	20,5	22,6	24,4	26,1	27,5	28,6	31,7	33,7	36,0	35,4	34,6
$2 \cdot 10^3$	4,9	9,0	11,1	14,4	16,2	17,7	19,0	20,2	21,2	22,2	24,5	26,5	28,3	30,0	31,2	34,6	36,8	39,2	38,7	37,9
$5 \cdot 10^3$	5,6	10,1	13,4	15,8	17,7	19,3	20,7	22,0	23,2	24,3	27,0	29,4	31,4	33,3	34,3	38,2	40,7	43,2	43,0	42,2
10^4	6,8	11,5	14,7	17,1	19,0	20,7	22,3	23,6	24,9	26,0	28,8	31,3	33,6	35,5	36,9	40,9	43,7	46,5	46,3	45,2
$2 \cdot 10^4$	8,0	12,9	16,0	18,3	20,2	21,9	23,4	24,8	26,3	27,6	30,6	33,2	35,6	37,8	39,2	43,4	46,5	50,8	49,6	48,6
$5 \cdot 10^4$	8,6	13,8	17,0	19,6	21,8	23,6	25,2	26,9	28,4	29,9	33,0	35,9	38,4	40,8	42,3	47,2	50,4	55,0	54,0	53,0
10^5	10,0	15,8	18,2	20,8	23,0	24,9	26,7	28,4	30,0	31,5	34,9	38,0	40,7	43,2	44,7	50,0	53,4	58,3	57,2	56,1
$2 \cdot 10^5$	11,3	15,9	19,3	21,8	24,1	26,1	28,1	29,9	31,6	33,3	36,8	40,1	43,0	45,4	47,1	52,6	56,4	61,8	60,8	59,8
$5 \cdot 10^5$	12,0	16,9	20,4	23,2	25,6	27,8	29,9	31,8	33,6	35,4	39,1	42,5	45,5	48,3	49,9	56,1	60,2	66,0	65,0	64,0
10^6	12,8	17,9	21,4	24,2	26,7	28,9	31,2	33,3	35,2	37,0	41,1	44,7	47,8	50,6	52,3	58,8	63,3	69,0	68,3	67,0
$2 \cdot 10^6$	13,5	18,9	22,1	25,0	27,7	30,3	32,7	34,8	36,8	38,7	42,9	46,6	49,9	52,8	54,7	61,4	66,2	72,3	71,2	70,3
$5 \cdot 10^6$	14,5	19,4	23,2	26,5	29,3	32,2	34,6	36,7	38,8	40,9	45,5	49,4	52,7	55,7	57,7	64,9	70,3	76,5	75,5	74,8
10^7	15,0	20,3	24,3	27,6	30,5	33,2	35,8	38,1	40,2	42,4	47,1	51,3	54,8	57,9	60,1	67,5	73,1	79,4	78,8	78,0

Толщина защиты из свинца ($\rho = 11,3 \text{ г/см}^3$) для различной кратности ослабления k γ -излучения (широкий пучок)

Кратность ослабления k	Толщина защиты, см, при энергии γ -излучения, МэВ																			
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	3	4	6	8	10
1,5	0,05	0,1	0,15	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,95	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,2	1,0	0,9	0,9
2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,15	1,3	1,5	1,7	1,85	2,0	2,0	2,1	2,0	1,6	1,5	1,35
5	0,2	0,4	0,6	0,9	1,1	1,5	1,9	2,2	2,5	2,8	3,4	3,8	4,1	4,3	4,4	4,6	4,5	3,8	3,3	3,0
8	0,2	0,5	0,8	1,1	1,5	1,95	2,35	2,8	3,2	3,5	4,2	4,8	5,25	5,5	5,7	5,9	5,8	5,0	4,3	3,8
10	0,3	0,55	0,9	1,3	1,6	2,1	2,6	3,05	3,5	3,8	4,5	5,1	5,6	5,9	6,1	6,5	6,4	5,5	4,9	4,2
20	0,3	0,6	1,1	1,5	2,0	2,6	3,25	3,85	4,4	4,9	5,8	6,6	7,2	7,6	7,8	8,3	8,2	7,1	6,3	5,6
30	0,35	0,7	1,15	1,7	2,3	3,0	3,65	4,3	4,95	5,5	6,5	7,3	8,0	8,5	8,8	9,3	9,2	8,0	7,2	6,3
40	0,4	0,8	1,3	1,8	2,4	3,1	3,8	4,5	5,2	5,8	6,85	7,8	8,6	9,1	9,4	10,0	9,9	8,7	7,8	6,8
50	0,4	0,85	1,4	1,95	2,6	3,25	3,95	4,6	5,3	6,0	7,2	8,2	9,0	9,6	10,0	10,6	10,5	9,2	8,3	7,3
60	0,45	0,9	1,45	2,05	2,7	3,45	4,2	4,95	5,6	6,3	7,5	8,6	9,5	10,1	10,4	11,0	10,9	9,7	8,7	7,7
80	0,45	1,0	1,55	2,15	2,8	3,7	4,5	5,3	6,0	6,7	8,0	9,2	10,1	10,7	11,1	11,7	11,6	10,4	9,4	8,2
100	0,5	1,0	1,6	2,3	3,0	3,85	4,7	5,5	6,3	7,0	8,45	9,65	10,6	11,3	11,7	12,2	12,1	10,9	9,9	8,7
$2 \cdot 10^2$	0,6	1,25	1,9	2,6	3,4	4,4	5,3	6,3	7,2	8,0	9,65	11,1	12,2	12,9	13,4	14,0	13,8	12,6	11,4	10,2
$5 \cdot 10^2$	0,65	1,4	2,2	3,1	4,0	5,1	6,1	7,2	8,2	9,2	11,3	12,9	14,2	15,0	15,4	16,3	16,1	14,9	13,3	11,9
10^3	0,7	1,5	2,4	3,3	4,4	5,7	6,95	8,1	9,2	10,2	12,3	14,1	15,5	16,5	17,0	18,0	17,8	16,5	15,1	13,3
$2 \cdot 10^3$	0,85	1,7	2,7	3,8	5,0	6,3	7,6	8,8	10,0	11,1	13,5	15,4	16,8	17,9	18,5	19,7	19,5	18,1	16,6	14,8
$5 \cdot 10^3$	0,9	1,9	3,0	4,2	5,5	7,0	8,5	9,9	11,2	12,4	14,9	17,0	18,6	19,8	20,5	21,9	21,7	20,3	18,5	16,6
10^4	1,05	2,1	3,3	4,55	5,9	7,5	9,1	10,6	12,0	13,3	16,1	18,3	20,1	21,3	22,1	23,5	23,4	22,0	20,1	18,0
$2 \cdot 10^4$	1,1	2,2	3,5	4,85	6,3	8,0	9,7	11,3	12,8	14,2	17,2	19,5	21,4	22,7	23,5	25,1	25,0	23,6	21,7	19,5
$5 \cdot 10^4$	1,15	2,35	3,7	5,2	6,9	8,7	10,5	12,3	14,0	15,6	18,8	21,4	23,3	24,7	25,5	27,3	27,2	25,8	23,7	21,5
10^5	1,15	2,4	3,8	5,4	7,2	9,2	11,1	13,0	14,8	16,5	20,1	22,7	24,7	26,2	27,0	28,9	28,9	27,5	25,3	22,9
$2 \cdot 10^5$	1,3	2,6	4,1	5,7	7,6	9,6	11,6	13,6	15,6	17,4	21,3	24,1	26,1	27,6	28,5	30,5	30,5	29,2	26,9	24,3
$5 \cdot 10^5$	1,4	2,8	4,4	6,1	8,2	10,2	12,3	14,4	16,5	18,5	22,3	25,4	27,8	29,5	30,4	32,7	32,7	31,4	28,9	26,3
10^6	1,45	3,0	4,7	6,5	8,7	10,9	13,1	15,3	17,5	19,5	23,5	26,8	29,2	31,0	32,0	34,3	34,4	33,0	30,4	27,7
$2 \cdot 10^6$	1,55	3,2	5,0	7,0	9,1	11,5	14,0	16,3	18,5	20,4	24,4	27,8	30,5	32,4	33,5	36,0	36,1	34,6	32,0	29,2
$5 \cdot 10^6$	1,65	3,3	5,3	7,3	9,6	12,1	14,7	17,2	19,5	21,6	26,2	29,7	32,3	34,3	35,5	38,1	38,3	36,8	34,0	31,1
10^7	1,7	3,4	5,4	7,6	10,1	12,6	15,2	17,8	20,3	22,5	27,5	31,2	33,9	35,8	37,0	39,7	39,9	38,4	35,5	32,5

Таблицы 2.5.5 Значения слоев ослабления (г/см^2) для точечного изотропного источника в бесконечной защите и поправка на барьерность для различных материалов (вода, бетон, свинец)

Вода

E_0 , МэВ	$\Delta_{1/2}$	$\Delta_{1/10}$	$\Delta_{1/100}$	$\Delta_{1/1000}$	$\Delta_{1/10}^{\text{ac}}$	δ_D
0,1	29	44	64	81	16,8	
0,2	29	49	73	94	20,2	
0,3	28	51	78	103	23,0	
0,4	27	53	83	110	25,2	
0,5	27	55	87	116	27,5	0,750
0,6	27	57	91	122	29,5	0,759
0,662	27	58	94	126	30,5	0,763
0,7	27	59	96	129	31,5	0,767
0,8	27	60	98	134	32,8	0,777
1,0	28	63	105	144	36,5	0,797
1,25	29	68	115	158	40,5	0,839
1,5	29	71	122	168	44,0	0,863
2,0	31	78	136	190	50,8	0,892
3,0	34	91	161	227	62,5	0,924
4,0	37	101	181	258	72,5	0,941
6,0	41	116	213	305	88,8	0,961
8,0	45	128	236	341	100,5	0,970
10	47	136	253	367	109,8	0,974

Обычный бетон

E_0 , МэВ	$\Delta_{1/2}$	$\Delta_{1/10}$	$\Delta_{1/100}$	$\Delta_{1/1000}$	$\Delta_{1/10}^{\text{ac}}$	δ_D
0,1	14,3	27,8	45,1	61,2	15,4	
0,2	20,7	41,2	65,8	88,6	21,4	
0,3	22,8	46,9	75,7	102	24,9	
0,4	23,9	51,1	83,5	113	27,7	
0,5	24,8	54,3	89,5	122	30,0	0,799
0,6	25,5	57,0	94,8	130	32,5	0,810
0,662	26,0	58,9	98,2	134	33,6	0,815
0,7	25,8	58,9	98,7	135	34,0	0,819
0,8	26,4	61,9	104	143	36,6	0,829
1,0	27,4	66,5	113	156	40,2	0,845
1,25	28,8	71,8	123	171	44,6	0,867
1,5	29,9	76,4	132	184	48,9	0,882
2,0	32,2	84,4	148	207	56,3	0,905
3,0	36,3	97,5	174	246	68,4	0,930
4,0	38,9	106	193	274	77,6	0,946
6,0	41,9	119	219	315	92,0	0,965
8,0	43,0	125	235	340	100,6	0,976
10	45,8	131	246	356	107,0	0,983

Свинец

E_0 , МэВ	$\Delta_{1/2}$	$\Delta_{1/10}$	$\Delta_{1/100}$	$\Delta_{1/1000}$	$\Delta_{1/10}^{\text{ac}}$	δ_D
0,1	0,3	0,9	1,9	3,2	1,2	
0,145	0,4	1,2	2,3	3,4	1,1	
0,2	0,9	2,7	5,1	7,6	2,4	
0,3	2,2	6,7	13,6	19,3	6,2	
0,4	3,8	12,5	23,8	34,0	11,0	
0,5	5,9	18,1	34,0	49,9	15,9	0,983
0,6	7,4	22,7	44,2	64,6	20,4	0,984
0,662	8,5	26,1	49,9	73,7	23,0	0,984
0,8	11,0	34,0	63,5	93,0	28,6	0,984
1,0	13,6	43,1	80,5	117,9	35,4	0,986
1,25	17,0	51,0	95,2	139,5	42,0	0,986
1,5	19,3	59,0	110,0	159,9	48,2	0,987
2,0	22,7	68,0	128,1	186,0	55,0	0,989
3,0	24,9	73,7	139,5	203,0	61,2	0,990
4,0	24,9	73,7	139,5	203,0	62,1	0,993
6,0	23,8	70,3	133,8	197,3	61,5	0,994
8,0	23,8	69,2	131,5	193,9	61,2	0,995
10	23,8	68,0	131,5	193,9	61,0	0,996