

ТЕМА 2.6 МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ И ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ ЗАЩИТЫ ОТ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Взаимодействие нейтронов с веществом

Все источники нейтронного излучения испускают быстрые нейтроны, которые, взаимодействуя с ядрами поглощающей среды, испытывают упругое и неупругое рассеяние. Вероятность того или иного процесса различна и зависит от энергии нейтронов и вещества, через которое проходят нейтроны.

Наиболее значимый вид взаимодействия быстрых нейтронов с энергией выше 0,5 МэВ – упругое столкновение с ядрами, при этом на более легких ядрах нейтроны теряют большую энергию. К таким материалам относятся водородосодержащие вещества (вода, тяжелая вода, парафин, полиэтилен, пластмассы и др.).

Наряду с упругим рассеянием нейтроны с энергией свыше 0,5 МэВ испытывают и неупругое рассеяние, причем для быстрых нейтронов с энергией выше 10 МэВ неупругое рассеяние становится столь же вероятным, как и упругое. При неупругих столкновениях ядра поглотителя переходят в возбужденное состояние и, возвращаясь в основное состояние, испускают гамма-кванты или β -частицы.

В результате упругого и неупругого рассеяния быстрые нейтроны замедляются до тепловых. Тепловые нейтроны диффундируют через поглотитель, пока не выйдут за его пределы или не будут захвачены ядрами поглотителя по реакции (n, γ) . Поэтому защита от нейтронов одновременно должна обеспечить и защиту от гамма-излучения. Значит, защита от нейтронов должна быть многокомпонентной.

Под действием нейтронного излучения многие материалы активизируются и становятся радиоактивными. Поэтому при выборе защитных материалов предпочтение следует отдавать материалам с малым сечением активации.

Характеристика защитных материалов

При выборе материалов защиты определяющими факторами являются защитные и механические свойства материалов, их стоимость, масса и объем. Под защитными свойствами материалов понимают их замедляющую и поглощающую способность к активации под действием ИИ; под механическими – механическую прочность, способность сохранять размеры; под химическими – стойкость к ИИ, к химическим реагентам, огнестойкость, нетоксичность.

Для замедления быстрых нейтронов до тепловых применяют вещества с малым атомным номером Z . Наиболее эффективными материалами являются водородосодержащие вещества: вода, тяжелая вода, бетон, парафин, полиэтилен, различные пластмассы. После того как быстрые нейтроны замедлились, они могут быть поглощены. Для этой цели применяют материалы с большим сечением поглощения σ_a – бор и материалы с добавками бора: борные стали, бораль, борный графит, карбид бора, борированная вода и бетон.

Поглощение нейтронов может сопровождаться захватным гамма излучением, поэтому при выборе материала для поглощения тепловых нейтронов надо отдавать предпочтение таким, которые дают наименьшее захватное излучение.

Приведем краткую характеристику отдельных защитных материалов.

Вода – наиболее распространенный и допустимый материал, который используется для замедления быстрых нейтронов и как защитный материал. На атомах водорода нейтроны эффективно замедляются и превращаются в тепловые. При поглощении тепловых нейтронов в воде возникает захватное гамма-излучение с энергией $E_\gamma = 2,23$ МэВ. Применение борированной воды резко снижает захватное гамма-излучение. В борированной воде атомы бора легко поглощают тепловые

нейтроны, а захватное гамма-излучение обладает меньшей энергией ($E_\gamma = 0,5 \text{ МэВ}$).

Бетон является хорошим замедлителем и поглотителем быстрых нейтронов, интенсивно поглощает гамма-излучение. В состав бетона входят цемент, песок и гравий. Цемент состоит в основном из окислов различных элементов (Ca, Si, Al, Fe), содержит легкие элементы. Для получения бетона с наибольшей плотностью в него добавляют наполнители: лимонитовые, боритовые руды, железный скрап. Концентрация бетонной защиты может быть монолитной (для больших реакторов) и состоять из отдельных блоков. Как правило, бетон применяют в стационарных защитных устройствах.

Свинец является одним из наиболее распространенных материалов для защиты от гамма-излучения. Его используют в качестве защитного материала при изготовлении контейнеров, блочных защитных экранов, коллиматоров и защитных устройств, когда необходима их компактность и малая масса. К недостаткам свинца как защитного материала следует отнести его малую механическую прочность и низкую температуру плавления ($t_{\text{пл}} = 327 \text{ }^\circ\text{C}$).

Железо, сталь различных сортов являются основными материалами для изготовления корпусов реакторов, различных коммуникаций, арматуры для защиты из других материалов. Как защита от нейтронного излучения сталь более эффективна, чем свинец. К недостаткам железа следует отнести его способность активизироваться под действием тепловых нейтронов с образованием радионуклида ^{59}Fe , излучающего гамма-кванты с энергиями 1,1 и 1,29 МэВ. При поглощении тепловых нейтронов образуется захватное гамма-излучение с энергией гамма-квантов 7,5 МэВ. Для снижения захватного излучения в сталь вводят добавки бора (борные стали). Для снижения наведенной гамма-активности при проектировании защиты используют сталь с наименьшим содержанием в ней марганца, тантала, кобальта и других примесей,

способных легко активизироваться под действием тепловых нейтронов. Из стали изготавливаются боксы, укрытия, шкафы, контейнеры и другое оборудование для защиты от гамма-излучения.

Кадмий хорошо поглощает нейтроны с энергией меньше 0,5 МэВ, но при этом возникает захватное гамма-излучение с энергией гамма-квантов до 7,5 МэВ. Несмотря на то, что листовой кадмий толщиной 0,1 см снижает плотность потока тепловых нейтронов примерно в 10^9 раз, это делает его малоприменимым для защиты от тепловых нейтронов. Кадмий не обладает достаточно хорошими механическими свойствами. Температура плавления кадмия $t_{пл} = 32$ °С, что также ограничивает его применение. Чаще применяется сплав кадмия со свинцом, обладающий лучшими механическими свойствами и неплохими защитными свойствами от нейтронного и гамма-излучений.

Органические соединения – парафин, полиэтилен, пластмасса, фторопласты. Они содержат в своем составе большое количество водорода и поэтому хорошо замедляют быстрые нейтроны. Органические материалы хорошо обрабатываются механически. Защитные устройства из них можно отливать любой формы. В качестве защитных материалов органические материалы можно использовать в условиях сравнительно невысоких температур, так как при высоких температурах они размягчаются и изменяют свои размеры. Для полиэтилена температура размягчения около 115°. Для уменьшения захватного гамма-излучения в органические материалы добавляют различные соединения бора (карбид бора, борную кислоту и т. п.).

Вторичное гамма-излучение в защитах

Под вторичным понимается ионизирующее излучение, возникающее в результате взаимодействия первичного излучения с рассматриваемой средой. Одним из наиболее проникающих видов вторичного излучения является вторичное гамма-излучение в защите, сопровождающее захват и

неупругое рассеяние нейтронов на ядрах изотопов конструкционных, строительных материалов и материалов биологической защиты.

Высокие потоки нейтронов в защитах ядерно-технических установок могут создавать высокую плотность источников вторичного гамма-излучения. Поэтому в ряде случаев радиационная обстановка за защитой ядерно-технических установок целиком определяется вторичным гамма-излучением.

Задача определения поля вторичного гамма-излучения в среде сводится к интегрированию вкладов в поле излучения в данной точке детектирования, обусловленных вторичными фотонами, образующимися в актах взаимодействия с нейтронами во всем объеме защиты.

Отметим некоторые важные закономерности формирования вторичного гамма-излучения в средах:

1. В легких средах отношение $\cdot H_{\gamma}^{\max} / H_n^{\max}$ растет с ростом толщины среды d , проходит при некотором d_0 через 1 и с дальнейшим ростом d становится больше 1. Величина d_0 для нейтронов спектра деления при измерении дозовых характеристик равняется 36 см для воды, 50 см для водорода, 67 см для гидрида лития, 54 см для борированной воды с массовой долей бора 1 %.

2. Для тяжелых веществ $\cdot H_{\gamma}^{\max} / H_n^{\max}$ с толщиной защиты d изменяется слабо (значительно слабее, чем в легких средах).

3. Отношение $\cdot H_{\gamma}^{\max} / H_n^{\max}$ как функция толщины защиты практически не зависит от углового распределения нейтронов на входе в защиту для широкого класса азимутально-симметричных угловых распределений излучения источников нейтронов.

4. Гамма-излучение, сопровождающее неупругое рассеяние нейтронов на ядрах, обычно вносит значительный вклад в характеристики поля вторичного гамма-излучения, когда на входе в среду имеется жесткий спектр нейтронов.

5. Задание спектра гамма-излучения, генерируемого при радиационном захвате, не зависящем от энергии захватываемых нейтронов, может приводить к погрешностям зависимости $H_\gamma^{\max} / H_n^{\max}$ от d до 30-40 % .

6. К существенным погрешностям расчетов может приводить неучет вклада в поле вторичного гамма-излучения различных изотопов примесей с большими сечениями захвата, особенно для материалов, имеющих, подобно свинцу, небольшие сечения радиационного захвата.

7. Наилучшими с точки зрения минимума выхода вторичного гамма-излучения являются среды, состоящие из смеси легких и тяжелых веществ.

8. Для снижения выхода захватного гамма-излучения можно использовать гомогенное или гетерогенное борирование среды.

Приближенные методы расчета защиты от нейтронов

Точные методы расчета защиты от нейтронного излучения математически сложны. Нами будут рассмотрены простейшие методы. Ослабление плотности потока моноэнергетических нейтронов узкого пучка (мощности поглощенной дозы) в зависимости от толщины защиты d описывается формулой

$$\phi = \phi_0 \exp(-\Sigma d) \quad (2.6.1)$$

где ϕ – плотность потока нейтронов за защитой, нейтр / (см²·с);

ϕ_0 – плотность потока нейтронов в отсутствии защиты, нейтр / (см²·с);

Σ – полное макроскопическое сечение поглотителя, см⁻¹;

d – толщина защиты, см.

Плотность потока ϕ_0 – величина, измеренная или рассчитанная исходя из мощности нейтронного источника (внешнего выхода нейтронов) q :

$$\phi_0 = \frac{q}{4R^2} \quad (2.6.2)$$

где q – мощность источника, нейтр/с в угле 4π ,

R – расстояние от источника, см.

Полное макроскопическое сечение Σ складывается из макроскопического сечения рассеяния Σ_s и макроскопического сечения поглощения Σ_a

$$\Sigma = \Sigma_s + \Sigma_a \quad (2.6.3)$$

и равно $\Sigma = \sigma \cdot n_a$, где n_a – концентрация атомов, т.е. количество атомов поглотителя в единице объема (атом/см³) $n_a = \frac{\rho N_A}{M}$;

σ – полное макроскопическое сечение взаимодействия нейтронов с ядрами поглотителя, см⁻¹, зависящее от энергии нейтронов, состава вещества поглотителя и других факторов. Оно состоит из макроскопического сечения рассеяния σ_s и макроскопического сечения поглощения σ_a :

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_a.$$

Под макроскопическим сечением поглощения здесь понимается сумма сечений всех возможных взаимодействий нейтронов со средой защитного экрана (n, γ), (n, α), (n, p), (n, f), в результате которых нейтрон поглощается или захватывается. Тогда

$$\Sigma = \sigma n_a = \frac{\rho N_A}{M} (\sigma_s + \sigma_a) = \Sigma_s + \Sigma_a \quad (2.6.4)$$

Если вещество поглотителя состоит из нескольких элементов, то

$$\Sigma = \sum_{i=1}^m \sigma_i n_{a,i}$$

Значения σ_s и σ_a приводятся в справочниках в барнах: 1 барн = 10⁻²⁴ см² (геометрическое поперечное сечение ядер также порядка 10⁻²⁴ см²).

Приведем значение σ_s и σ_a для некоторых материалов в табл. 2.6.1.

Таблица 2.6.1 Микроскопические сечения рассеяния и поглощения для тепловых нейтронов

Элемент	σ_a , барн	$\bar{\sigma}_s$, барн	Элемент	σ_a , барн	$\bar{\sigma}_s$, барн
¹ H	0,328±0,002	38±4 (газ)	⁴⁸ Cd	2537±9	7±1
² He	0	0,8±0,2	<i>g</i> =1,338		
³ Li	70,4±0,4	1,4±0,3	⁴⁹ In	194±2	2,2±0,5
⁴ Be	0,010±0,001	7±1	<i>g</i> =1,020		
⁵ B	758±4	4±1	⁵⁰ Sn	0,625±0,015	4±1
⁶ C	(3,73±0,07)·10 ⁻³	4,8±0,2	⁵¹ Sb	5,7±1,0	4,3±0,5
⁷ N	1,88±0,05	10±1	⁵² Te	4,7±0,1	5±1
⁸ O	<2·10 ⁻⁴	4,2±0,3	⁵³ I	6,22±0,25	3,6±0,5
⁹ F	<1·10 ⁻²	3,9±0,2	⁵⁴ Xe	74±1	4,3±0,4
¹⁰ Ne	0,032±0,009	2,4±0,3	⁵⁵ Cs	28±1	7±1
¹¹ Na	0,531±0,008	4,0±0,5	⁵⁶ Ba	1,2±0,1	8±1
¹² Mg	0,063±0,003	3,6±0,4	⁵⁷ La	8,9±0,2	9,3±0,7
¹³ Al	0,241±0,003	1,4±0,1	⁵⁸ Ce	0,73±0,08	2,8±0,5
¹⁴ Si	0,16±0,02	1,7±0,3	⁵⁹ Pr	11,3±0,2	4,0±0,4
¹⁵ P	0,20±0,02	5±1	⁶⁰ Nd	49,9±2,2	16±3
¹⁶ S	0,52±0,02	1,1±0,2	⁶² Sm	5828±30	
¹⁷ Cl	33,8±1,1	16±3	<i>g</i> =1,638		
¹⁸ Ar	0,66±0,04	1,5±0,5	⁶³ Eu	4406±30	8±1
¹⁹ K	2,07±0,07	1,5±0,3	<i>g</i> =0,999		
²⁰ Ca	0,44±0,02	3,2±0,3	⁶⁴ Gd	46 617±100	
²¹ Sc	24±1	24±2	<i>g</i> =0,888		
²² Ti	5,8±0,4	4±1	⁶⁵ Tb	46±3	
²³ V	5,00±0,01	5±1	⁶⁶ Dy	940±20	100±20
²⁴ Cr	3,1±0,2	3,0±0,5	⁶⁷ Ho	65±3	
²⁵ Mn	13,2±0,1	2,3±0,3	⁶⁸ Er	173±17	
²⁶ Fe	2,62±0,06	11±1	⁶⁹ Tm	127±4	7±3
²⁷ Co	37,1±1,0	7±1	⁷⁰ Yb	37±4	12±5
²⁸ Ni	4,6±0,1	17,5±1	⁷¹ Lu	112±5	
²⁹ Cu	3,81±0,03	7,2±0,7	⁷² Hf	101,4±0,5	8±2
³⁰ Zn	1,10±0,02	3,6±0,4	<i>g</i> =1,020		
³¹ Ga	2,80±0,13	4±1	⁷³ Ta	21,0±0,7	5±1
³² Ge	2,45±0,20	3±1	⁷⁴ W	19,2±1,0	5±1
³³ As	4,3±0,2	6±1	⁷⁵ Re	86±4	14±4
³⁴ Se	11,7±0,1	11±2	⁷⁶ Os	15,3±0,7	15,3±1,5
³⁵ Br	6,82±0,06	6±1	⁷⁷ Ir	440±20	
³⁶ Kr	31±2	7,2±0,7	⁷⁸ Pt	8,8±0,4	10±1
³⁷ Rb	0,73±0,07	5,5±0,5	⁷⁹ Au	98,6±0,3	9,3±1,0
³⁸ Sr	1,21±0,06	10±1	<i>g</i> =1,005		
³⁹ Y	1,31±0,08		⁸⁰ Hg	374±5	20±5
⁴⁰ Zr	0,185±0,004	8±1	<i>g</i> =0,998		
⁴¹ Nb	1,16±0,02	5±1	⁸¹ Tl	3,4±0,5	14±2
⁴² Mo	2,70±0,04	7±1	⁸² Pb	0,170±0,002	11±1
⁴³ Tc	22±3	5±1	⁸³ Bi	0,034±0,002	9±1
⁴⁴ Ru	2,56±0,12	6±1	⁹⁰ Th	7,56±0,11	12,6±0,2
⁴⁵ Rh	149±4	5±1	⁹² U	7,68±0,07	8,3±0,2
⁴⁶ Pd	8,0±1,5	3,6±0,6	<i>g</i> =0,99		
⁴⁷ Ag	64,5±0,6	6±1			

Формулу (2.6.1) можно записать в виде

$$\phi = \phi_0 \exp\left(-\frac{N_A \rho}{M} (\sigma_s + \sigma_a)\right) = \phi_0 \exp(-(\Sigma_s + \Sigma_a)d) \quad (2.6.5)$$

При расчете ослабления плотности потока быстрых нейтронов через вещество, состоящее из легких элементов, пользуются макроскопическим сечением рассеяния Σ_s , и, наоборот, при ослаблении потока нейтронов за

счет поглощения нейтронов средой пользуются макроскопическим сечением поглощения Σ_a .

Если упругим или неупругим рассеиванием нельзя пренебречь, то при расчетах пользуются полным макроскопическим сечением Σ .

Нетрудно определить слой половинного ослабления нейтронов:

$$\Delta_{1/2} = 0,693 / \Sigma. \quad (2.6.6)$$

Если в формуле (2.6.1) принять ϕ за предельно допустимую плотность потока нейтронов $\phi = \phi_{\text{ДПП}}$, тогда кратность ослабления $K_{\text{осл}}$ определяется соотношением:

$$K_{\text{осл}} = \frac{\phi_0}{\phi} = \exp(\Sigma d) \quad (2.6.7)$$

Значение $\phi_{\text{ДПП}}$ можно брать из табл. 2.6.2 (извлечение из Гигиенического норматива «Критерии оценки радиационного воздействия»).

Таблица 2.6.2 Значения эффективной дозы и среднегодовые допустимые плотности потока моноэнергетических нейтронов для лиц из персонала при внешнем облучении всего тела

Энергия нейтронов, МэВ	Эффективная доза на единичный флюенс, 10^{-12} , Зв \times см ²		Среднегодовая допустимая плотность потока $\phi_{\text{ДПП}}$, см ⁻² \times с ⁻¹	
	*ИЗО	*ПЗ	*ИЗО	*ПЗ
тепловые нейтроны	3,30	7,60	9,90+2	4,30+2
1,0-7	4,13	9,95	7,91+2	3,28+2
1,0-6	5,63	1,38+1	5,80+2	2,37+2
1,0-5	6,44	1,51+1	5,07+2	2,16+2
1,0-4	6,45	1,46+1	5,07+2	2,24+2
1,0-3	6,04	1,42+1	5,41+2	2,30+2
1,0-2	7,70	1,83+1	4,24+2	1,79+2
2,0-2	1,02+1	2,38+1	3,20+2	1,37+2

5,0-2	1,73+1	3,85+1	1,89+2	8,49+1
1,0-1	2,72+1	5,98+1	1,20+2	5,46+1
2,0-1	4,24+1	9,90+1	7,71+1	3,30+1
5,0-1	7,50+1	1,88+2	4,36+1	1,74+1
1,0	1,16+2	2,82+2	2,82+1	1,16+1
1,2	1,30+2	3,10+2	2,51+1	1,05+1
2,0	1,78+2	3,83+2	1,84+1	8,53
3,0	2,20+2	4,32+2	1,49+1	7,56
4,0	2,50+2	4,58+2	1,31+1	7,13
5,0	2,72+2	4,74+2	1,20+1	6,89
6,0	2,82+2	4,83+2	1,16+1	6,76
7,0	2,90+2	4,90+2	1,13+1	6,67
8,0	2,97+2	4,94+2	1,10+1	6,61
10	3,09+2	4,99+2	1,06+1	6,55
14	3,33+2	4,96+2	9,81	6,59
20	3,43+2	4,80+2	9,52	6,81
* - ИЗО - изотропное (4π) поле излучения, ПЗ - облучение параллельным пучком в передне-задней геометрии.				

Зная слой половинного ослабления и рассчитав число слоев n по кратности ослабления, можно найти требуемую толщину защиты d :

$$d = \Delta_{1/2} / n, \text{ см.} \quad (2.6.8)$$

Величина $l = \frac{1}{\Sigma}$ называется средней длиной свободного пробега нейтронов в веществе. Соотношение (2.6.1) может быть переписано в виде

$$\phi = \phi_0 \exp\left(-\frac{d}{l}\right) \quad (2.6.9)$$

Метод длин релаксации

В практической работе, особенно на ранних стадиях проектирования защиты от нейтронов, часто используют упрощенные методы расчета прохождения нейтронов через защиту. Это метод сечения выведения и метод длин релаксации. Оба этих метода предназначены для определения пространственного распределения функции ослабления плотности потока быстрых нейтронов.

Рассмотрим метод длин релаксации.

Ослабление плотности потока нейтронов в широком пучке может быть описано соотношением (2.6.9), где вместо длины пробега l используется длина релаксации L , которая характеризует толщину вещества, экспоненциальную зависимость ослабления нейтронов в среде для широких пучков нейтронов. Т.е. **длина релаксации L** — это толщина вещества, ослабляющая интенсивность нейтронного излучения в e раз.

Длина релаксации определяется для отдельных участков защиты, в пределах которых ослабление нейтронов может быть описано экспоненциальной зависимостью с постоянным значением L . В таких случаях плотность потока нейтронов можно определить по формуле

$$\phi = \phi_0 \exp\left(-\sum_{i=1}^m \frac{\Delta d_i}{L_i}\right), \quad (2.6.10)$$

где Δd_i — толщина защиты i -го участка, для которого длину релаксации можно принять постоянной; m — число участков, на которые разбита толщина защиты.

Длина релаксации зависит от материала защиты и первоначального энергетического спектра нейтронов. В таблицах 2.6.3-2.6.4 приведены эмпирические данные по о длинам релаксации для различных источников нейтронов.

Таблица 2.6.3 Длина релаксации (г/см^2) нейтронов точечных изотропных моноэнергетических источников и (α , n)-источников для различных материалов

Среда	Энергия нейтронов источника, МэВ (источник)	Толщина ослабляющего слоя, г/см^2	Длина релаксации плотности потока нейтронов различных энергий по дозе, г/см^2				
			тепловые и медленные	более 2 МэВ	более 3 МэВ	более 0,33 МэВ	полной
Алюминий	4,0	135	—	38,1	—	—	—
	14,9	135	—	42,6	—	—	—
Бериллий	3	35	—	13,8	—	—	—
	15	70–85	—	18,9	—	—	—
Вода	2	60	—	—	—	4,5	—
	4	90	—	—	—	6,2	—
	6	120	—	—	—	9,3	—
	8	120	—	—	—	11,2	—
	10	120	—	—	—	12,6	—
	14	120	—	—	—	14,2	—
	14–15	125	14,2	—	—	14,5	—
	(Po—В)	120	—	—	—	—	6,3
	(Ra—Be)	120	—	—	—	—	9,8
	(Po—Be)	120	—	—	—	—	10,3
(Pu—Be)	120	—	—	—	—	10,5	
Бетон	(Po—Be)	Более 35	—	Около 35	—	—	—
Графит	4,0	118	—	19,0	—	—	—
	14,1	80–110	—	—	38,0	—	—
	14,9	185	—	32,9	—	—	—
Железо	4,0	350	—	59,5	51,0	—	—
	14,9	430	—	64,2	62,7	—	—
Плексиглас	4,0	70	—	7,32	—	—	—
	14,9	85	—	17,7	—	—	—
Полиэтилен	4,0	60	—	5,05	—	—	—
	14,9	69	—	12,8	—	—	—
Свинец	4,0	565	—	169	—	—	—
	14,9	620	—	273	—	—	—

Таблица 2.6.4 Длина релаксации (г/см^2) быстрых нейтронов реактора или нейтронов от источника спектра деления в воде, графите, свинце и железе

Среда	Область энергий детектируемых нейтронов, МэВ								Толщина ослабляющего слоя, г/см^2
	0,7–1,5	1,5–2,5	2,5–4	4–10	2–10	3–10	5–10	7–10	
Вода	6,7	6,8	7,3	8,9	7,6	8,1	9,6	10,1	0–30
	8,1	8,5	8,5	10,0	9,1	9,3	10,4	11,2	30–60
	9,6	9,7	9,8	11,1	10,6	10,6	11,3	12,6	60–100
	8,1	8,3	8,5	10,0	9,0	9,3	10,4	11,3	0–100
Графит	17,0	17,5	16,1	23,0	18,9	20,9	23,0	20,0	0–50
	18,4	19,7	18,7	23,4	20,0	21,7	24,0	21,7	50–100
	21,2	21,7	21,7	24,0	23,0	22,4	25,4	23,4	100–150
	24,6	26,0	25,4	26,4	26,4	26,4	27,8	25,6	150–220
	20,4	21,2	20,5	24,2	22,0	22,9	25,0	22,7	0–220
Свинец	170	144	119	107	117	107	109	109	0–840
Железо	93,6	65,5	53,9	50,0	55,4	50,7	49,2	49,2	0,510

Окончательно, плотность потока нейтронов на расстоянии R от изотропного точечного источника быстрых нейтронов, прошедших слой защиты толщиной d , определяется соотношением

$$\phi = \frac{q \cdot f}{4\pi R^2} \exp\left(-\sum_{i=1}^m \frac{\Delta d_i}{L_i}\right), \quad (2.6.11)$$

где q — интенсивность нейтронов, испускаемых источником; f — коэффициент, характеризующий отклонение от экспоненциальной формы кривой ослабления на близком расстоянии (2–3 длины релаксации) от источника (см. табл. 2.6.5); L — длина релаксации.

Таблица 2.6.5 Коэффициент отклонения от экспоненциального закона ослабления нейтронов с энергией $E_n > 1,5$ МэВ на близком расстоянии от источника

Среда	Энергия нейтронов источника, МэВ						
	2	4	6	8	10	14	14,9
Алюминий	—	3,5	—	—	—	—	2,5
Вода	—	5,4	4,6	4,2	3,3	2,9	3,0
Водород	3,5	3,5	3,5	2,8	2,8	2,8	—
Графит	—	1,4	—	—	—	—	1,3

Железо	—	4,9	—	—	—	—	2,7
Карбид бора	—	5,0	—	—	—	—	1,8
Плексиглас	—	2,1	—	—	—	—	2,1
Полиэтилен	—	2,4	—	—	—	—	2,5
Свинец	—	4,0	—	—	—	—	2,9

Метод сечений выведения

Точный расчет толстостенной защиты от быстрых нейтронов требует сложных вычислений. На практике широкое распространение получил полуэмпирический метод «сечения выведения», с помощью которого можно определить ослабление быстрых нейтронов в гетерогенной защите, включающей водородосодержащие материалы, например, металловодной защите.

Все процессы, приводящие к поглощению нейтронов, учитываются в сечении выведения: упругое и неупругое рассеяние, а также поглощение нейтронов. Сечение выведения определяется расчетным или экспериментальным путем.

Для оценки сечения выведения $S_{\text{выв}}$ можно воспользоваться приближенной формулой

$$\Sigma_{\text{выв}} = \Sigma_{\text{полн}} - \Sigma_{\text{расс}} \overline{\cos \theta}, \quad (2.6.12)$$

где $\Sigma_{\text{полн}}$ — полное сечение; $\Sigma_{\text{расс}}$ — сечение упругого рассеяния нейтронов; $\overline{\cos \theta}$ — средний косинус угла рассеяния нейтронов.

Экспериментально найдено, что для нейтронов с энергией 8 МэВ $\Sigma_{\text{выв}} \approx (0,6, 0,7) \Sigma_{\text{полн}}$. При изотропном рассеянии нейтронов в среде $\Sigma_{\text{выв}} = \Sigma_{\text{полн}}$.

В зависимости от способа введения вещества в защиту различают сечения выведения для гетерогенных сред (слой вещества вводится в водородсодержащую среду вблизи источника) и сечения выведения для гомогенных сред (вещество равномерно распределяется в водородсодержащем материале). Сечения выведения, измеренные в гомогенных средах (табл. 2.6.6), могут быть использованы для расчета

мощности дозы нейтронов в гетерогенных средах. Различие в сечениях для всех элементов не более 5–10 %.

Таблица 2.6.6 Сечения выведения для гомогенных сред ($E > 1$ МэВ)

Материал	$\sigma_{\text{выв}}, 10^{-24} \text{ см}^2$	Материал	$\sigma_{\text{выв}}, 10^{-24} \text{ см}^2$
Be	0,9	Ti	$1,70 \pm 0,05$
C	$0,72 \pm 0,05$	Fe	$1,90 \pm 0,10$
H	$1,00 \pm 0,05$	Zr	$2,37 \pm 0,05$
Li	$0,90 \pm 0,05$	Pb	$3,60 \pm 0,20$
O	$0,87 \pm 0,05$		

Закон ослабления мощности дозы нейтронов *в гетерогенной среде* можно записать следующим образом:

$$\dot{D}(R) = \dot{D}_H(R-d) \exp(-\Sigma_{\text{быг}} d), \quad (2.6.13)$$

где $\dot{D}(R, d)$ — мощность дозы быстрых нейтронов на расстоянии R от источника нейтронов при наличии пластины из тяжелого материала толщиной d ; $\dot{D}_H(R-d)$ — мощность дозы быстрых нейтронов в чистом водородсодержащем материале толщиной $(R-d)$ в отсутствие пластины; $\sigma_{\text{выв}}$ — сечение выведения для тяжелого материала толщиной d .

Если известна плотность потока, падающего на защиту толщиной d , от плоского мононаправленного источника нейтронов ϕ_0 , то плотность потока нейтронов на расстоянии R от источника нейтронов будет равна

$$\phi(R) = \phi_0 \exp[-\Sigma_{\text{H}_2\text{O}}(R-d) - \Sigma_{\text{быг}} d], \quad (2.6.14)$$

где $\Sigma_{\text{H}_2\text{O}}$ — макроскопическое сечение взаимодействия нейтронов с водой.

Закон ослабления мощности дозы нейтронов гомогенной смесью водорода с тяжелыми компонентами при массовой доле водорода в смеси не менее 0,3 % можно записать в виде

$$\dot{D}(R) = \dot{D}_H \exp\left(-\sum_{i=1}^n \sigma_{\text{быг},i} \cdot n_i \cdot R\right), \quad (2.6.15)$$

где $\dot{D}(R)$ — мощность дозы нейтронов на расстоянии R от источника в гомогенной смеси; $\dot{D}_H(R)$ — мощность дозы нейтронов на расстоянии R от источника в чистом водороде; $\sigma_{\text{быг},i}$ — микроскопическое сечение выведения i -го компонента; n_i — концентрация ядер (число ядер i -го

компонента в единице объема смеси); R — расстояние между источником нейтронов и точкой, в которой измеряется мощность дозы.

Для гомогенных сред плотность потока нейтронов на расстоянии R от плоского мононаправленного источника нейтронов равна

$$\phi(R) = \phi_0 \exp\left(-(\sigma_{H_2O} n_{H_2O} + \sigma_{\text{выб}} n) \cdot R\right), \quad (2.6.16)$$

где σ_{H_2O} и $\sigma_{\text{выб}}$ — микроскопические сечения взаимодействия нейтронов с водой и тяжелым компонентом соответственно; n_{H_2O} и n — количество молекул воды и тяжелого компонента в единице объема смеси.