

РАДИАЦИОННЫЕ ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОБЕТОНОВ

УДК 691.328

Липтев Геннадий Алексеевич

Доцент кафедры автомобильных дорог и специальных инженерных сооружений ГОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева», кандидат технических наук

1. Ионизирующие излучения и радиационно-защитные материалы

Ионизирующие излучения свое название получили по способности вызывать ионизацию атомов и молекул в облучаемом веществе. Все ионизирующие излучения по своей природе подразделяются на электромагнитные и корпускулярные [1].

К электромагнитным относятся рентгеновское излучение, γ -излучение и тормозное излучение, возникающие при прохождении через вещество сильно ускоренных заряженных частиц. Видимый свет и радиоволны – также электромагнитные излучения, но с большей длиной волны.

Все остальные виды ионизирующих излучений имеют корпускулярную природу, представляя собой пучки ядерных частиц, ядер элементов или ионов. Большинство из них заряженные корпускулы: β -частицы (электроны); протоны (ядра водорода); дейтроны (ядра тяжелого водорода – дейтерия); α -частицы (ядра гелия) и тяжелые ионы – ядра других элементов. К корпускулярным излучениям относят и не имеющие заряда ядерные частицы – нейтроны. Ниже рассмотрены сведения о различных ионизирующих излучениях.

Электромагнитные излучения. Глубина проникновения ионизирующего излучения зависит с одной стороны от природы излучения, заряда и энергии составляющих его частиц и квантов, а с другой – от состава, плотности и особенностей облучаемого вещества. Так, α -частицы, испускаемые радием, полностью ослабляются слоем алюминия толщиной порядка 0,01 мм; β -частицы – слоем алюминия толщиной несколько миллиметров; γ -кванты – слоем алюминия толщиной порядка десятков дециметров [1].

Фотоны γ - и рентгеновского излучения обладают наибольшей проникающей способностью. Средняя длина их пробега в веществе зависит главным образом от его плотности. Она минимальна в материалах, подобных свинцу, используемых обычно в качестве защитных экранов [2].

Проникающая способность характеризуется величиной пути распространения излучения в окружающей среде и зависит от его энергии, выраженной в килоэлектрон-вольтах (КэВ) и мегаэлектрон-вольтах (МэВ).

В табл. 1 приведены величины максимального пробега частиц и излучений в зависимости от энергии частиц или кванта [3, 4].

Таблица 1

Максимальный пробег частиц и средний путь распространения
 γ -квантов в зависимости от их энергии

Энергия частиц или квантов, МэВ		Пробег частиц	
		в воздухе	в мягких тканях
Альфа-частицы	1,0	0,5 см	5,3 мк
	2,0	1,0 см	10 мк
	3,0	3,5 см	35 мк
Бета-частицы	0,1	0,15 м	0,28 мм
	0,8	2,2 м	3,5 мм
	1,4	4,6 м	6,4 мм
	1,7	6,0 м	8,0 мм
Гамма-кванты	0,1	49 м	6,0 см
	0,5	88 м	10,5 см
	1,0	120 м	14,0 см
	5,0	270 м	33,0 см
	20,0	470 м	56,0 см

Существуют три основных механизма взаимодействия электромагнитного излучения с веществом: фотоэлектрический эффект, эффект Комптона, образование электронно-позитронных пар [1].

Энергия падающего кванта полностью поглощается веществом, в результате чего появляются свободные электроны. Они обладают кинетической энергией, величина которой равна энергии кванта за вычетом работы выхода электрона с данного энергетического уровня. С повышением энергии излучения вероятность фотоэффекта быстро уменьшается и для излучений с энергией 1 МэВ его вкладом можно пренебречь [1].

При энергии квантов выше энергии связи электронов в атоме γ -квант может упруго рассеяться на электроне. При этом часть энергии γ -кванта передается выбитому электрону. Электрон и вторичный квант излучения могут обладать достаточным запасом энергии, чтобы вызвать в дальнейшем новые акты ионизации. Вторичные и третичные кванты излучения могут в дальнейшем взаимодействовать с атомами и молекулами по типу фотоэффекта (рис. 1) [3].

При относительно высоких энергиях γ -квантов (выше 1 МэВ) взаимодействие излучений с веществом может происходить особым путем, в результате которого образуются две легкие элементарные частицы с противоположными знаками – электрон и позитрон [1]. Замедлившийся позитрон взаимодействует с каким-либо электроном среды с образованием двух γ -квантов с энергией по 0,51 МэВ. Этот процесс называется аннигиляцией. В дальнейшем эти γ -кванты взаимодействуют с атомами среды по типу фото- или Комpton-эффекта.

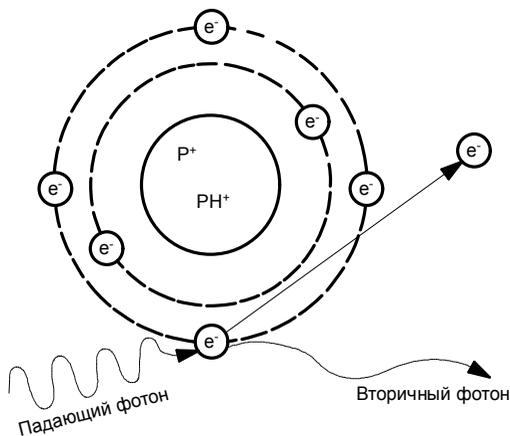


Рис. 1 Адсорбция энергии фотона рентгеновского излучения при эффекте Комптона

Корпускулярные излучения. При прохождении через вещество заряженная частица теряет свою энергию, вызывая ионизацию и возбуждение атомов до тех пор, пока общий запас энергии не уменьшится до такой степени, что частица потеряет ионизирующую способность [2]. В зависимости от знака заряда при пролете частицы в веществе она испытывает электростатическое взаимодействие с частицами атома. Она притягивается или отталкивается от положительно заряженных ядер или от несущих отрицательный заряд электронов. Чем больше масса летящей частицы, тем меньше она отклоняется от первоначального направления. Полет протонов и более тяжелых ядерных частиц практически прямолинеен, а траектория полета легких электронов сильно изломана вследствие рассеяния на орбитальных электронах и в результате притяжения к ядрам атомов. Вследствие этого скорость электрона снижается, и часть его энергии теряется и испускается фотон тормозного излучения. Следовательно, при прохождении через вещество электронов высокой энергии одновременно происходит образование электромагнитного излучения.

В отличие от заряженных частиц нейтроны не несут электростатического заряда и не вступают во взаимодействие с электронами атомной оболочки, что позволяет им проникать в глубь атомов. Достигая ядер, они либо поглощаются ими, либо отталкиваются от них. При упругом рассеянии на ядрах углерода, азота, кислорода, согласно [5], нейтрон теряет лишь 10–15% энергии, а при упругом столкновении с почти равными им по массе ядрами водорода – протонами энергия нейтрона уменьшается в среднем вдвое, передаваясь протону отдачи (рис. 2).

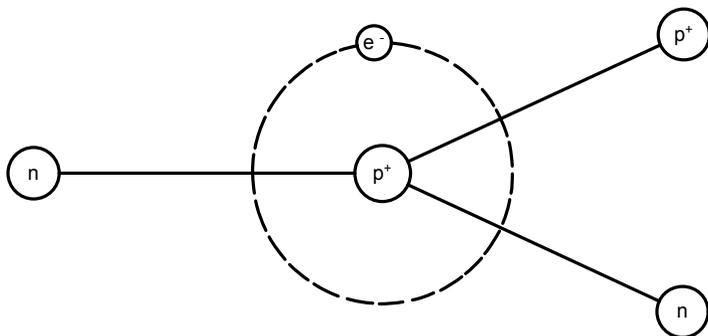


Рис. 2. Взаимодействие быстрого нейтрона с атомом водорода облучаемого материала

Поэтому вещества, содержащие большое количество водорода, – графит, вода, парафин, пластмассы, используют для защиты от нейтронного излучения больших энергий. В них нейтроны быстро теряют свою энергию и замедляются, а медленные нейтроны, как правило, эффективнее, чем быстрые, поглощаются веществом. Допустим, пучок быстрых нейтронов проходит через тяжелое вещество, например, свинец, ядра которого во много раз тяжелее нейтронов. В таком веществе нейтроны в результате рассеяния на ядрах будут терять свою энергию очень малыми порциями и должны проходить в нем большие расстояния, прежде чем потеряют значительную долю своей начальной энергии. Замедляющие способности веществ при нейтронном облучении приведены в табл. 2 [5, 6].

Таблица 2

Элемент или вещество	Массовое число	Логарифмический декремент потери энергии на одно столкновение, ζ	Замедляющая способность $\xi \Sigma_s$, 1/см	Число столкновений, замедляющих нейтрон от энергии 2 МэВ до тепловой
H	1	1,000	-	18
H ₂ O	18	-	1,53	20
He	4	0,425	$1,6 \cdot 10^{-5}$	43
Li	7	0,268	-	67
Be	9	0,209	0,176	86
C	12	0,158	0,064	114
O	16	0,120	-	150
U	238	0,00838	0,0103	2172
Pb	207	0,0073	0,025	1890

Ядра большинства веществ при поглощении нейтронов становятся неустойчивыми и, распадаясь, порождают протоны, α -частицы и фотоны γ -излучения, и другие ядра также способны производить ионизацию [5]. При таких ядерных процессах могут образоваться радиоактивные изотопы элементов и возникнуть наведенная радиация, в свою очередь также вызывающая ионизацию.

Следовательно, вклад того или иного вида ядерного взаимодействия нейтронов зависит от их энергии, а также от состава облучаемого вещества.

По величине энергии различают следующие виды нейтронов [7]:

1. Сверхбыстрые нейтроны с энергией свыше 300 МэВ. Отличаются слабым взаимодействием с ядрами (прозрачность ядер для сверхбыстрых нейтронов) и появлением «реакции скалывания», в результате которой бомбардируемое ядро испускает несколько осколков.

2. Очень быстрые нейтроны с энергией 20–300 МэВ. Отличаются ядерными реакциями с вылетом большого числа частиц.

3. Быстрые нейтроны с энергией от 0,5 до 20 МэВ. Эти нейтроны характеризуются как упругим, так и неупругим рассеянием и возникновением ядерных реакций.

4. Промежуточные нейтроны с энергией от 0,5 кэВ до 0,5 МэВ. Для нейтронов этой группы наиболее типичным процессом взаимодействия является упругое рассеяние.

5. Резонансные нейтроны. Наблюдаются в области энергий от нескольких электрон-вольт до 500 эВ. У таких нейтронов велика вероятность поглощения тяжелыми ядрами (Ас, U и др.).

6. Медленные нейтроны. Они подразделяются на холодные нейтроны с энергией менее 0,025 эВ, тепловые (с энергией от 0,025 до 0,5 эВ) и надтепловые (с энергией выше 0,5 эВ). В поглощающей среде обычно наблюдается реакция захвата медленных нейтронов.

Быстрые нейтроны эффективно замедляются до тепловых веществами с малым порядковым номером. К таким материалам относятся водородсодержащие вещества: парафин, вода, пластмассы, резина.

Для эффективного поглощения тепловых нейтронов используются материалы, обладающие большим сечением захвата (материалы с высоким содержанием бора и кадмия).

При проведении расчета защиты от нейтронного излучения следует учитывать, что защита от этого вида излучения основывается на поглощении тепловых и медленных нейтронов, а быстрые нейтроны сначала должны замедляться.

Исходя из этого, следует отметить, что защитные свойства материалов от нейтронного излучения определяются замедляющей и поглощающей способностью, степенью их активации и способностью поглощать γ -излучение.

2. Теоретические предпосылки по созданию металобетонов с высокими радиационно-защитными свойствами

Для защиты от α - и β -излучения, в отличие от γ - и нейтронного излучения, не требуется больших толщин поглощающих экранов. Глубина проникновения ионизирующего излучения зависит от вида энергии и природы излучения, а также от состава и плотности облучаемого вещества. Длина пробега электромагнитного излучения минимальна в плотных материалах, например в свинце. Поэтому в качестве эффективного защитного экрана от γ -излучения обычно используются свинец, тяжелые бетоны и т.д.

Быстрые нейтроны удобнее предварительно замедлить в результате упругого рассеяния на ядрах вещества с малым порядковым номером (парафин, вода, углеводороды, пластмасса, резина), превратив их в тепловые, а затем поглотить ядрами бора, кадмия и другими материалами с большим сечением захвата.

Таким образом, защита от ионизирующего излучения с одной стороны основывается на замедлении быстрых нейтронов и поглощении тепловых нейтронов, а с другой стороны – на поглощении γ -квантов.

В настоящее время в качестве защитных материалов применяются свинец, железо, баритобетон, обычный тяжелый бетон, кирпич, свинцовая резина и свинцовое стекло. Степень ослабляющего воздействия принято определять свинцовым эквивалентом, который является выраженным в миллиметрах толщиной свинца с ослаблением ионизирующего излучения в такой же степени, как и используемый защитный материал (табл. 3).

Таблица 3

Свинцовые эквиваленты различных материалов для рентгеновского излучения до 200 кв. макс. и γ -излучения радия

Материал	Плотность, г/см ²	Толщина свинца, мм	Эквивалентная толщина материала, мм			
			При макс. напряжении на рентгеновской трубке, кВ			При γ -излучении, Ra
			100	150	200	
Железо	7,9	1	6	11	12	2,5
		2	12	25	27	5
Баритобетон	3,2	1	10	10	14	6
		2	21	21	30	12
Баритобетон	2,7	1	17	17	22	7
		2	38	38	50	13
Бетон	2,2	1	85	85	80	8
		2	160	160	150	16
Кирпич	1,6	1	130	130	130	11
		2	240	240	240	20

Рассмотрим проникающую способность излучений.

Прохождение тепловых нейтронов через вещество. При прохождении пучка тепловых нейтронов через вещество возможно два вида их взаимодействия с ядрами вещества. Во-первых, в результате соударения нейтронов с ядрами возможно упругое рассеяние нейтронов, во-вторых происходят ядерные реакции типа: (α, n) – α -частица – нейтрон, (p, n) – протон – нейтрон, (γ, n) – γ -квант – нейтрон [8].

Изменение плотности коллимированного потока нейтронного излучения dI в результате взаимодействия нейтронов с веществом будет пропорционально плотности падающего потока нейтронов I , числу атомов вещества в единице объема N и длине пути нейтронов в веществе dx , т.е.

$$dI = -N \cdot \sigma \cdot I \cdot dx, \quad (1)$$

где σ – эффективное сечение взаимодействия нейтронов с ядрами вещества (измеряется в барнах, $1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$).

Если обозначить I_0 плотность потока нейтронов на поверхности защиты, т.е. при $x = 0$, а I_x – плотность потока нейтронов за слоем защиты x , то в результате интегрирования выражения (1) получим:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\sigma N x}. \quad (2)$$

Тогда ослабление падающего нейтронного потока находится :

$$\varepsilon = \frac{I_0 - I_x}{I_0} = \frac{I_0 - I_0 \cdot e^{-\sigma N x}}{I_0} = 1 - e^{-\sigma N x}. \quad (3)$$

Коэффициент пропорциональности σ , характеризующий вероятность любого взаимодействия нейтрона с атомами вещества, имеет размерность см^2 и называется микроскопическим эффективным нейтронным поперечным сечением ядра. Нейтронные сечения для большинства изотопов известны и приведены в работе [5].

Прохождение γ -излучения через вещество. При прохождении γ -излучения через вещество наблюдается ослабление интенсивности пучка из-за его взаимодействия с атомами среды. Взаимодействие квантов излучения характеризуется тем, что каждый фотон выбывает из пучка в результате одиночного акта. Следовательно, число выбывающих из пучка фотонов dJ пропорционально проходимоу ими слою dx и числу падающих фотонов J_0 .

Пусть на поверхность какой-либо среды падает параллельный пучок интенсивностью J_0 . После прохождения слоя толщиной dx интенсивность уменьшится на величину dJ . Тогда

$$dJ = -\mu \cdot J_0 \cdot dx, \quad (4)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления, показывающий вероятность и долю того, что на единице пути в веществе произойдет поглощение или рассеяние кванта.

Коэффициент μ определяется по формуле

$$\mu = - \frac{dJ}{J_0 \cdot dX} . \quad (5)$$

Интегрируя выражение (3) по всей толщине облучаемого материала, получим формулу ослабления интенсивности параллельного пучка излучения:

$$J = J_0 \cdot e^{-\mu x} . \quad (6)$$

Так как линейный коэффициент ослабления излучения зависит от плотности среды, для характеристики ослабления пользуются массовым коэффициентом ослабления $\mu_{\text{мас}}$, равным отношению линейного коэффициента ослабления μ к плотности среды ρ , см²/г

$$\mu_m = \mu / \rho . \quad (7)$$

Подставив значение массового коэффициента ослабления μ_m в формулу (6), получим

$$J = J_0 \cdot e^{-\mu_m \cdot \rho \cdot X} . \quad (8)$$

В этом случае вместо обычной толщины ослабляющего слоя x , см, в формулу ослабления вводят произведение плотности ρ на истинную толщину x , г/см². Если взять для примера свинец толщиной 1 мм (0,1 см), то при плотности свинца 1,13 г/см³ условная толщина будет равна 1,13 г/см². Для нахождения истинной толщины по условной необходимо значение условной толщины разделить на плотность вещества.

Если облучаемое вещество сложного строения, то имеет место тот же самый закон экспоненциального ослабления, но в этом случае коэффициент ослабления выражается формулой [9]

$$\mu_m = N_A \cdot \sum_i \frac{\rho_i}{A_i} \cdot \mu_{m_i} , \quad (9)$$

где N_A – число Авогадро;

ρ_i – плотность i -го элемента;

A_i – атомный вес i -го элемента;

μ_{m_i} – массовый коэффициент ослабления для i -го элемента.

Для характеристики поглотительной способности материалов удобно использовать толщину слоя половинного поглощения – такую толщину образца, которая ослабляет падающий поток в 2 раза:

$$I_{1/2} = I_0 \cdot e^{-N \cdot \sigma \cdot X_{1/2}} . \quad (10)$$

Легко получить, учитывая формулу (3), выражение для толщины слоя половинного поглощения:

$$X_{1/2} = - \frac{\ln 2}{\ln(1 - \varepsilon)}. \quad (11)$$

3. Примеры расчета и экспериментальное исследование радиационных защитных свойств металлобетонов

Прохождение тепловых нейтронов через вещество. Опираясь на указанные выше принципы моделирования защиты композиционных материалов от ионизирующего излучения, рассмотрены металлобетоны со свинцовой матрицей и различными заполнителями. Составы приведены в табл. 4.

Таблица 4
Составы металлобетонов для определения радиационных защитных свойств

Компоненты	Номер составов и количество компонентов, % об.					
	1	2	3	4	5	6
Свинец	35	35	35	35	35	35
Кварцевый песок	65					
Оксид магния		65				
Карбид бора			65			
Фарфор				65		
Доломит					65	
Базальт						65

На первом этапе установлены плотность и химический состав компонентов металлобетонов. Для принятых компонентов плотность равна, г/см³: свинец – 11,3; кварцевый песок – 2,65; оксид магния – 3,58; карбид бора – 2,519; фарфор – 2,8; доломит – 2,65-2,86; базальт – 2,99–3,00, а химический состав заполнителей следующий: кварцевый песок – $\beta \cdot \text{SiO}_2$; оксид магния – MgO ; карбид бора – B_4C ; фарфор – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; доломит – $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$; базальт, состоящий в основном из авгита $(\text{Ca}(\text{Mg} \cdot \text{Fe}) \cdot (\text{Si}_2\text{O}))$ и оливина $[(\text{Mg} \cdot \text{Fe})_2 \cdot \text{SiO}_4]$, имел следующий состав, кг/м³: вода – (H – 2, O – 20), O – 1369, Mg – 183, Al – 291, Si – 759, K – 36, Ca – 214, Fe – 126 [10].

Методом замеса смешивали компоненты в среде углекислого газа, смесь заливалась в формы и уплотнялась с применением вибрации. Были изготовлены образцы размером 60×40×10 мм с применением заполнителей фракции 0,37–1,25 мм.

Предотвращение аварий зданий и сооружений

Определяем плотность элементов ρ и сечение захвата тепловых нейтронов ядром i -го элемента заполнителя (σ_i – «эффективное поперечное сечение»), барн [8]. Результаты расчетов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Плотность и «эффективное поперечное сечение» элементов

Элемент	Плотность ρ , г/см ³	σ , барн (10^{-24} см ²)
H	$0,08988 \cdot 10^{-3}$	$330 \cdot 10^{-3}$
O	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$< 0,2 \cdot 10^{-3}$
C	2,22 – 2,25	$3,2 \cdot 10^{-3}$
Mg	1,74 – 1,75	$64 \cdot 10^{-3}$
Al	2,7	$230 \cdot 10^{-3}$
Si	2,2 – 2,49	0,13
K	0,86 – 0,87	1,97
Ca	1,54 – 1,55	0,43
Fe	7,6 – 7,9	2,53
B	2,32 – 2,34	769
Pb	11,25 – 11,94	$170 \cdot 10^{-3}$

Как видно из табл. 5, наибольшее «эффективное поперечное сечение» оказалось у элемента бора, который эффективно захватывает тепловые нейтроны с энергией $E = 25 \cdot 10^{-3}$ эВ.

Выполним расчеты по радиационной стойкости металлобетона при воздействии тепловых нейтронов с энергией $E = 25 \cdot 10^{-3}$ эВ следующего состава (в% об.): свинец – 35, заполнитель – 65.

Расчеты поглощающей способности нейтронного излучения металлобетонами выполнялись при следующих предположениях:

- 1) На образец падает коллимированный поток нейтронов.
- 2) Энергия нейтронов принималась равной 0,025 эВ (тепловые нейтроны).

Каждое ядро всех компонентов металлобетонных поглощает нейтроны независимо. Поэтому формулу (3) можно представить в виде:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-\sum \sigma_i N_i \cdot d), \quad (12)$$

где σ_i – сечение захвата тепловых нейтронов ядрами i -го элемента;

N_i – концентрация ядер i -го элемента;

d – толщина поглотителя.

Если бетон состоит из атомов матрицы (Pb) и заполнителя, то

$$\varepsilon = 1 - \exp[-(n_{Pb} \cdot \sigma_{Pb} + \sum_i n_{z_i} \cdot \sigma_{z_i}) d], \quad (13)$$

где n_{Pb} и σ_{Pb} – концентрация ядер и сечение захвата нейтронов ядрами свинца;

n_{3i} и σ_{3i} – концентрация ядер и сечение захвата нейтронов ядрами i -го элемента заполнителя.

Число атомов свинца находим по формуле

$$n_{Pb} = \frac{\rho_{Pb} \cdot N_A}{M_{Pb}}, \quad (14)$$

где M_{Pb} – молярная масса свинца;

ρ_{Pb} – плотность свинца, $\rho_{Pb} = 11,3 \text{ г/см}^3$;

N_A – число Авогадро, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ г/моль}$.

Аналогично концентрация ядер i -го элемента заполнителя определяется по формуле

$$n_{3i} = \frac{\rho_{3i} \cdot N_A}{M_{3i}}, \quad (15)$$

где M_{3i} – молярная масса i -го элемента заполнителя;

ρ_{3i} – плотность i -го элемента заполнителя.

Для металлобетона с заполнителем в виде базальтового песка, учитывая сложную химическую формулу, расчет выполняется по каждому элементу в отдельности. Тогда формула (13) с учетом (14) и (15) запишется следующим образом:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-N_A \cdot d \cdot \left[\frac{\rho_{Pb} \cdot \sigma_{Pb} \cdot \%^{об}_{Pb}}{M_{Pb}} + \frac{\rho_3 \cdot \%^{об}_3 \cdot \left(\sum_i \sigma_{3i} \cdot K_i \right)}{M_3} \right]), \quad (16)$$

где K_i – количество атомов i -го элемента в молекуле заполнителя;

$\%^{об}_{Pb}$ и $\%^{об}_3$ – объемная доля свинца и заполнителя соответственно;

ρ_3 – плотность заполнителя.

Поглощающую способность металлобетона с базальтовым заполнителем определяем по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \exp \left[-N_A \cdot d \cdot \left(\frac{\rho_{Pb} \cdot \sigma_{Pb} \cdot \%^{об}_{Pb}}{M_{Pb}} + \sum_i \frac{\rho_{3i} \cdot \sigma_{3i}}{M_{3i}} \right) \right]. \quad (17)$$

Расчеты радиационных защитных свойств бетонов с матрицей из свинца (35% об.) и заполнителем из различных компонентов (65% об.) от

воздействия тепловых нейтронов производились на ЭВМ. Результаты расчетов представлены в табл. 6.

Таблица 6

Радиационные защитные свойства металлобетонов толщиной 1 см при прохождении тепловых нейтронов

Компоненты	Пропускание, %	Ослабление ϵ , %	Слой половинного ослабления $X_{1/2}$, см
SiO ₂	99,575	0,4246	162,876
B ₄ C	$1,466 \cdot 10^{-22}$	100,0	0,0126
MgO	99,650	0,349	197,979
Фарфор	98,881	1,118	61,631
Доломит	99,496	0,503	137,272
Базальт	98,844	1,155	59,630

Прохождение γ -излучения через вещество. Широкий пучок γ -квантов ослабляется в меньшей степени, чем узкий коллимированный из-за обратного попадания в него рассеянных квантов. В свою очередь широкий пучок ослабляется иначе, чем сферически расходящийся из точечного источника.

Закон ослабления широкого пучка записывают в виде:

$$J = J_0^{-\mu_m \cdot \rho \cdot X} \cdot B, \quad (18)$$

где B – фактор накопления.

Для расчетов использовались те же составы металлобетонов, принятые для расчета от воздействия тепловых нейтронов (см. табл. 4). Поскольку в состав заполнителя исследуемых бетонов входят вещества, слабо поглощающие γ -излучение, то их защитные свойства определяются только свинцом. Поэтому для определения защитных свойств металлобетонов используем табл. 7 и 8 [5, 11].

Таблица 7

Толщина защиты из свинца, мм, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ -излучения (широкий пучок)

Кратность ослабления	Энергия γ -излучения, МэВ									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
2	1	2	3	4	5	7	8	10	11,5	13
5	2	4	6	9	11	15	19	22	25	28
10	3	5,5	9	13	16	21	26	30,5	35	38
30	3,5	7	11,5	17	23	30	36,5	43	49,5	55
100	5	10	16	23	30	38,5	47	55	63	70
500	6,5	14	22	31	40	51	61	72	82	92

Таблица 8

Толщина защиты из бетона ($\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$), см, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ -излучения (широкий пучок)

Кратность ослабления	Энергия γ -излучения, МэВ									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
2	4,7	7,6	9,9	11,3	12,3	12,4	12,4	12,6	12,7	12,9
5	5,6	11,0	15,5	18,8	21,1	21,8	22,3	22,6	23,0	23,5
10	8,2	14,6	19,7	23,7	25,8	26,8	27,6	28,4	29,1	29,9
30	8,5	16,4	22,8	27,7	32,9	34,8	36,4	37,8	39,2	40,5
100	11,5	21,1	28,9	35,2	39,9	43,0	45,3	47,2	48,8	50,5
500	13,8	24,6	35,2	43,9	50,5	54,5	57,3	58,8	62,5	64,6

Расчеты для образцов металлобетонов размером $60 \times 40 \times 10$ мм с различными заполнителями, степенью наполнения в % по объему: заполнитель – 35% свинец + 65% показали, что основную роль в ослаблении γ -излучений играет свинец. Заполнитель играет несущественную роль и его влияние на степень ослабления составляет от 1 до 2%. Так при энергии γ -излучения 0,1 МэВ оно ослабляется в 30 раз, при 0,2 МэВ – в 5 раз, при 0,3 МэВ – в 4 раза, при 0,4 МэВ – в 2 раза.

Результаты расчетов приведены на рис. 3.

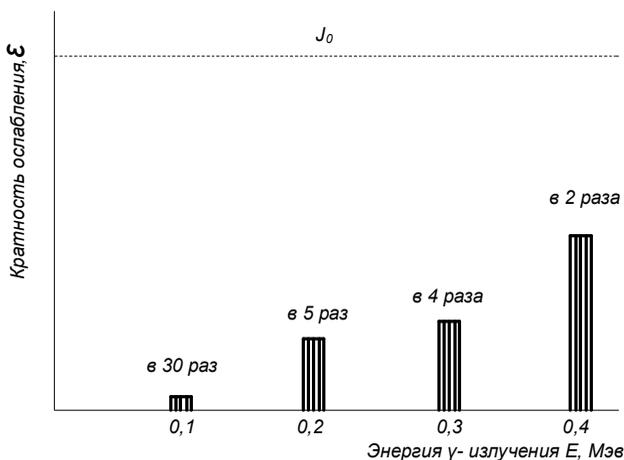


Рис. 3. Степень ослабления γ -квантов в зависимости от энергии излучения

4. Исследование прохождения рентгеновских лучей через материалы

Поглощающую способность плиток из метона размерами $40 \times 40 \times 2$ мм с различными наполнителями и свинцовой матрицей определяют на рентгеновской установке ДРОН-6 с медным анодом по схеме, показанной на рис. 4.

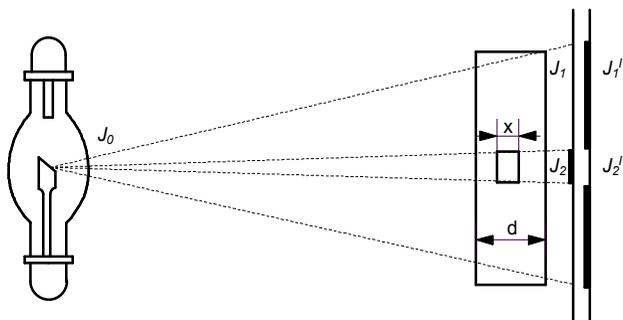


Рис. 4. Схема прохождения рентгеновских лучей через материал:
 J_0 – интенсивность излучения при выходе из рентгеновской трубки;
 J_1 – интенсивность излучения после прохождения через материал;
 J_2 – то же после прохождения через частицу наполнителя или дефект;
 d – толщина образца; x – размер включений

Рентгеновские лучи, проходя через материал, ослабевают вследствие потери энергии на абсорбцию и рассеяние. Абсорбированная энергия проявляется вновь как вторичное излучение, направление которого отклоняется от направления первичного излучения. Это является причиной рассеяния рентгеновских лучей [7].

Представим частицу наполнителя как дефект размером X внутри образца толщиной d . Интенсивность излучения при выходе из рентгеновской трубки J_0 после прохождения через композит обозначим через J . Линейный коэффициент поглощения композита обозначим через μ и запишем следующие зависимости:

$$J = J_0 \cdot e^{-\mu d} \quad \text{и} \quad \mu = \sum C_i \cdot \rho \cdot \mu_{i\text{мас}}, \quad (19)$$

где e – основание натурального логарифма; C_i – весовой процент i -го элемента; ρ – плотность смеси; $\mu_{i\text{мас}}$ – массовый коэффициент поглощения i -го элемента.

В качестве наполнителей по объему использовали: кварцевую муку (SiO_2) с плотностью $2,65 \text{ г/см}^3$; оксид магния (MgO) с плотностью $3,58 \text{ г/см}^3$; карбид бора (B_4C) с плотностью $2,519 \text{ г/см}^3$; фарфор ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) с плотностью $2,80 \text{ г/см}^3$; доломит ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) с

Предотвращение аварий зданий и сооружений

плотностью $2,75 \text{ г/см}^3$; базальт $[\text{Ca}(\text{Mg}\cdot\text{Fe})(\text{Si}_2\text{O}_6)(\text{Mg}\cdot\text{Fe})_2\cdot 2\text{K}(\text{SiO}_4)]$ с плотностью $3,00 \text{ г/см}^3$. Наполнитель вводился в количестве 65%.

Результаты испытаний и расчетные данные приведены в табл. 9.

На основании полученных экспериментальных и расчетных данных можно сделать вывод, что введение в свинцовую матрицу наполнителей позволяет получить достаточно эффективные защитные экраны от воздействия рентгеновского излучения. Но все же по защитным свойствам, а конкретно при рентгеновском излучении исследованные композиции уступают чистому свинцу [12, 13].

Таблица 9

Ослабление рентгеновского излучения в зависимости от толщины металлобетонных образцов

Составы бетонов, % по объёму	Ослабление рентгеновского излучения J/J_0 в зависимости от толщины образца, см				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Свинец, 100%	$3,22 \cdot 10^{-54}$	$1,03 \cdot 10^{-107}$ ($1,02 \cdot 10^{-107}$)	$3,30 \cdot 10^{-161}$	$1,10 \cdot 10^{-214}$	$3,50 \cdot 10^{-268}$
Свинец – 35% Карбид бора – 65%	$1,06 \cdot 10^{-19}$	$1,1245 \cdot 10^{-38}$ ($1,12 \cdot 10^{-38}$)	$1,19 \cdot 10^{-57}$	$1,26 \cdot 10^{-76}$	$1,34 \cdot 10^{-95}$
Свинец – 35% Кварцевый песок – 65%	$1,38 \cdot 10^{-21}$	$1,9124 \cdot 10^{-42}$ ($1,90 \cdot 10^{-42}$)	$2,64 \cdot 10^{-63}$	$3,65 \cdot 10^{-84}$	$5,05 \cdot 10^{-105}$
Свинец – 35% Оксид магния – 65%	$3,84 \cdot 10^{-22}$	$1,4758 \cdot 10^{-43}$ ($1,47 \cdot 10^{-43}$)	$5,66 \cdot 10^{-65}$	$2,17 \cdot 10^{-86}$	$8,36 \cdot 10^{-108}$
Свинец – 35% Фарфор – 65%	$5,29 \cdot 10^{-21}$	$2,8079 \cdot 10^{-41}$ ($2,80 \cdot 10^{-41}$)	$1,48 \cdot 10^{-61}$	$7,88 \cdot 10^{-82}$	$4,17 \cdot 10^{-102}$
Свинец – 35% Доломит – 65%	$9,83 \cdot 10^{-22}$	$9,6794 \cdot 10^{-43}$ ($9,65 \cdot 10^{-43}$)	$9,51 \cdot 10^{-64}$	$9,35 \cdot 10^{-85}$	$9,19 \cdot 10^{-106}$
Кварцевый песок – 100%	$0,516 \cdot 10^{-3}$	$2,660 \cdot 10^{-7}$ ($2,65 \cdot 10^{-7}$)	$1,37 \cdot 10^{-10}$	$7,07 \cdot 10^{-14}$	$3,64 \cdot 10^{-17}$
Примечание. В скобках приводятся экспериментальные данные, полученные для образцов толщиной 0,2 см					

5. Разработка конструкции защитного экрана от ионизационных излучений

Как известно, ядерный взрыв или авария на атомных электростанциях приводит к выбросу мощного потока корпускулярных частиц и электромагнитному излучению. Поэтому создание многослойной конструкции является весьма актуальной задачей.

Нами разработана многослойная конструкция, состоящая из железобетонной панели, по которой наносятся несколько слоёв покрытий (рис. 5).

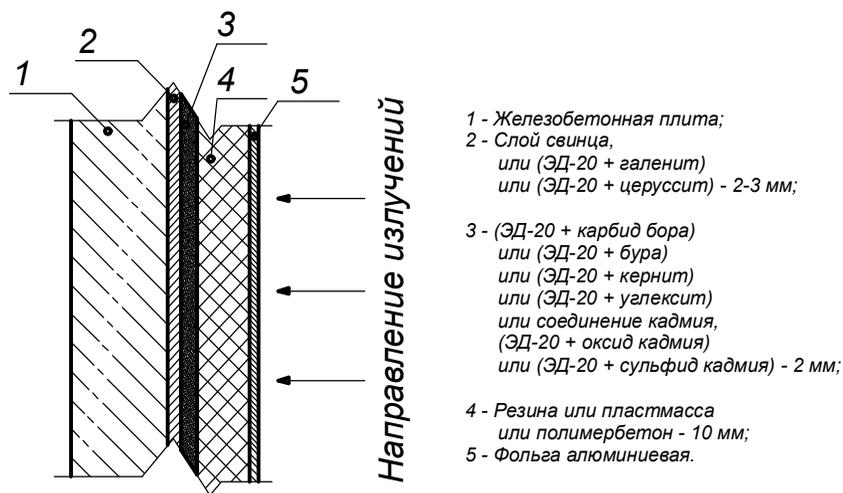


Рис. 5. Конструкция многослойной плиты для защиты от всех видов излучений

Предлагаемая конструкция изготавливается непосредственно на строительной площадке. На находящуюся в горизонтальном положении железобетонную плиту (поз. 1) на эпоксидном растворе (эпоксидная смола ЭД-20 с наполнителем) укладывается слой свинца (поз. 2) или композит (ЭД-20 + галенит) в соотношении 1:1. После наносится слой (ЭД-20 + карбид бора) в соотношении 1:1 (поз. 3). Затем укладывается эпоксидный полимербетон толщиной 10 мм (поз. 4). Для защиты от ультрафиолетовых лучей и обеспечения долговечности конструкции по клеевому слою укладывается алюминиевая фольга.

Работа такой конструкции заключается в следующем. Поток быстрых нейтронов в водородосодержащей среде (слой эпоксидного компаунда) быстро теряет свою энергию до тепловых нейтронов за 18-20 колебаний (поз. 4). Тепловые нейтроны активно поглощаются слоем (ЭД-20 + В₄С) (поз. 3). Слой половинного ослабления излучения тепловых нейтронов составляет 0,0126 см, тогда как у металлобетонов с кварцевым наполнителем – 162 см, а с базальтовым наполнителем – 59 см.

Слой свинца или (ЭД-20 + галенит) (поз. 2) активно поглощает рентгеновское и γ -излучения. Кроме того, вся конструкция активно поглощает α - и β - излучения, а также поток протонов. Слой фольги из алюминия защищает слой 4 от ультрафиолетового излучения солнечных лучей.

Заключение

Показано, что ионизирующие излучения подразделяются на электромагнитные и корпускулярные. При этом глубина проникновения излучения зависит, с одной стороны, от природы излучения, заряда и энергии ее частиц и квантов, а с другой – от состава, плотности и особенностей облучаемого вещества: α -частицы полностью ослабляются слоем алюминия толщиной порядка 0,01 мм; β -частицы слоем алюминия толщиной несколько миллиметров; γ -кванты – слоем алюминия толщиной порядка десятков дециметров. Показано, что существуют три основных механизма взаимодействия электромагнитного излучения с веществом: фотоэлектрический эффект, эффект Комптона и образование электронно-позитронных пар. В отличие от заряженных частиц нейтроны не несут электростатического заряда и не вступают во взаимодействие с электронами атомной оболочки, что позволяет им проникать через большие толщи материалов. Главную опасность для человека представляют γ -излучение, которое ослабляется веществом с большим атомным весом, и нейтронное излучение, которое ослабляется веществом с малым удельным весом (водород, вода, парафин, пластмассы), а затем поглощается веществами с большим сечением захвата. Приводятся примеры расчета радиационных защитных свойств металлобетонов при прохождении тепловых нейтронов и γ -квантов. Установлено, что экраны из металлобетонов способны эффективно защищать как от нейтронного, так и от γ -излучения. Разработана многослойная конструкция с высокими защитными свойствами от всех видов ионизирующих излучений (быстрых нейтронов, тепловых нейтронов, γ - и рентгеновских излучений), состоящая из железобетонной плиты с прикрепленными к ней пластинами на основе свинца и фольги с внешней облицовкой из полимербетона.

Библиографический список

1. Соломатов, В. И. Полимерные композиционные материалы в строительстве / В.И. Соломатов, А. Н. Бобрышев, К. Г., Химмлер; под ред. В. И. Соломатова. - М.: Стройиздат, 1988. - 312 с.
2. Исследование напряженно-деформированного состояния композитов с использованием метода конечных элементов / Б.В.Гусев, В.Г. Зазимко, Н.И. Нетеса // Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. - 1981. - №8. - С. 13-16.
3. Иродов, И.Е. Задачи по общей физике: учеб. пособие / И.Е. Иродов.-2-е изд., перераб. - М.: Наука, 1988. - 416 с.
4. Ковалев, Е.Е. Радиационный риск на Земле и в космосе / Е.Е. Ковалев. - М.: Атомиздат, 1976. - 256 с.

5. Справочник по ядерной физике / Под ред. Л.А. Арцимовича. - М.: Физматгиз, 1963. - 631 с.
6. Гусев, Н.Г. Физические основы защиты от излучений / Н.Г. Гусев, Л.Р. Кимель, В.П. Машков [и др.]. - М.: Атомиздат, 1969. - 120 с.
7. Кириллов, В.Ф. Радиационная гигиена : учебник / В.Ф. Кириллов, В.А. Книжников [и др.]; под ред. Л.А. Ильина. - М.: Медицина, 1988. - 336 с.
8. Соломатов, В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов // Новые композиционные материалы в строительстве. - Саратов, 1981. - С. 5-9.
9. Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах / П.А. Ребиндер. - М.: Наука, 1979. - 381 с.
10. Соломатов, В.И. Метон - новый конструкционный материал / В.И. Соломатов, Ю.Б. Потапов // Строительные материалы. - 1978. - №3. - С. 11.
11. Таблицы физических величин: справочник / Под ред. И.К. Кикоина. - М.: Атомиздат, 1976. - 1008 с.
12. А.С. 609271 СССР, МКИ² С 04 В 29/02. Металлобетонная смесь [Текст] / Ю.Б. Потапов, В.И. Соломатов, Г.А. Лаптев, Э.Л. Марьямов (СССР); опубл. 07.02.78, Бюл. №20.-2 с.
13. А.С. 658876 СССР, МКИ² С 04 В 29/02. Металлобетонная смесь [Текст] / Ю.Б. Потапов, В.И. Соломатов, Г.А. Лаптев, Э.Л. Марьямов, А.И. Бульменов (СССР); опубл. 28.12.78, Бюл. №15.-2 с.