

## **Бетоны для защиты от радиоактивного излучения**

Новицкий Н.Д., Юшин Л.Н.

Научный руководитель – Красулина Л.В.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

В связи с развитием ядерной энергетики и все более широким использованием атомной энергии в научных исследованиях, промышленности, сельском хозяйстве, здравоохранении необходимо обеспечить защиту обслуживающего персонала и окружающей территории от опасных радиоактивных воздействий.

Естественные радиоактивные вещества и искусственно получаемые радиоактивные изотопы воздействуют на живую ткань посредством испускаемых ими при распаде  $\alpha$  -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - лучей и нейтронов.  $\alpha$ -лучи (потоки ядер гелия) и  $\beta$  -лучи (потоки электронов) обладают сравнительно небольшой проникающей способностью. Значительно опаснее  $\gamma$ -лучи, представляющие собой поток фотонов, и нейтронное излучение.  $\gamma$ -лучи имеют скорость света и обладают большой проникающей способностью. Закон ослабления  $\gamma$  -излучения, проходящего через вещество, состоит в следующем: при последовательном увеличении толщины слоя вещества на одну и ту же величину интенсивность излучения уменьшается в одном и том же определенном отношении. Так называемый слой половинного ослабления уменьшает интенсивность излучения в 2 раза. Два таких слоя ослабят излучение в 4 раза, и каждый последующий слой будет дополнительно ослаблять излучение вдвое. Исходя из этого (с учетом некоторых других факторов) рассчитывается толщина защитного ограждения, необходимая для ослабления излучения до допустимой нормами интенсивности. Толщина слоя половинного ослабления  $\gamma$  -излучения зависит от плотности вещества-поглотителя: чем тяжелее материал, тем меньше толщина ограждения.

Незаряженные частицы нейтроны также обладают большой проникающей способностью. Не взаимодействуя с заряженными частицами атомов на расстоянии (как  $\alpha$ - и  $\beta$ - частицы), они замедляются только при соударениях. Наибольший эффект поглощения

энергии нейтронов имеет место при соударении их с частицами близкой к ним массы, например с ядрами водорода – протонами. В этом случае энергия нейтрона распределяется примерно поровну между двумя столкнувшимися частицами, т. е. нейтрон при каждом соударении значительно тормозится. При соударении с тяжелыми ядрами нейтрон отражается при сравнительно малой потере скорости. Поэтому в отличие от излучения наибольшее замедление нейтронов имеет место в веществах, содержащих легкие элементы, особенно водород. Веществом-замедлителем может служить, в частности, вода.

Материал	Плотность материала, г/см <sup>3</sup>	Толщина слоя половинного ослабления, см		
		от проникающей радиации	от радиоактивного заражения	от нейтронов
Вода	1,0	23,1	13,0	2,7
Древесина	0,7	33,0	18,5	9,7
Стекло	1,6	14,4	8,1	11,6
Бетон	2,3	10,0	5,7	12,0
Сталь	7,8	3,0	1,7	11,5
Свинец	11,3	2,0	1,2	12,0
Лёд	0,9	26,0	14,5	2,7

Основным материалом для одновременной защиты от  $\gamma$  - и нейтронного излучения являются особо тяжелые и гидратные бетоны. Поскольку гидраты, задерживающие поток нейтронов, содержатся в цементном камне, основное назначение тяжелых заполнителей – поглощение  $\gamma$ -лучей.

В качестве основного вяжущего для защитных бетонов и растворов используют портландцемент. [1-7] Сложные цементы, эффективные в качестве защиты от нейтронов всех энергетических групп и реакторного  $\gamma$ -излучения, могут быть изготовлены с использованием свинца, например, свинцово-бариевый и железо-свинцово-бариевый цементы. Изделия на основе этих цементов могут эксплуатироваться при температуре 550°C. [1; 2; 6] Свинцовый порошок в виде добавки вводят в состав вяжущего, представляющего собой

соединение редкоземельных элементов, в частности карбонатов гадолиния. Из него изготавливают экраны и плиты биологической защиты; прочность вяжущего в возрасте 48 часов близка к прочности гипса и портландцемента.

Важной составной частью бетона являются заполнители. Они образуют жёсткий скелет, который омоноличивается с помощью цементного камня в искусственную породу. [8; 9]

На сплошность контакта цементного теста и камня с поверхностью крупного заполнителя существенно влияют водоцементное отношение (В/Ц), а также размеры и форма заполнителей. При повышенных значениях В/Ц за счёт водоотделения при виброуплотнении, седиментации цемента и последующей контракции под зерном крупного заполнителя образуются пустоты и ослабленные зоны с пониженной объёмной концентрацией, как исходного цемента, так и гидратных новообразований, возникающих при последующем твердении. При чрезмерно высоких значениях В/Ц возможно расслоение бетонной смеси и возникновение ослабленных зон и пустот также и над зёрнами крупного заполнителя. На графике показана зависимость прочности бетонов, приготовленных на растворах прочностью свыше 20 МПа, от В/Ц. [6]

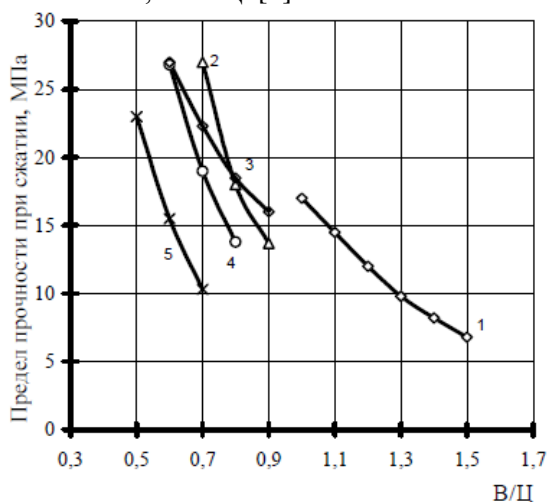


Рис. 1. Зависимость прочности бетона на разных заполнителях от В/Ц:  
1 - барит; 2 - магнетит; 3 - чугунный скрап; 4 - кварцевый песок;  
5 – лимонит

Как видно из графика, увеличение прочности заполнителей приводит к повышению прочности бетона. Причём у всех бетонов на указанных заполнителях, кроме баритового, происходит значительное изменение прочности в небольшом интервале изменения В/Ц. [6]

Исследование действия нейтронного излучения на различные виды заполнителей показало, что поток нейтронов может вызывать в облучаемом материале образование дефектов кристаллической решётки, частичный или полный переход одной полиморфной модификации в другую, аморфизацию кристаллических веществ. Эти структурные изменения могут проявляться в неизотропной линейной деформации образцов (до 6-7%), увеличении объёма (до 18 %), уменьшении плотности (до 15 %). [6; 7]

С увеличением температуры облучения степень радиационного изменения свойств бетона уменьшается вследствие преимущественного отжима дефектов в минералах при облучении. Наиболее значительно влияние температуры у силикатных пород (магматических и осадочных); увеличение температуры облучения с 40 до 100, 200 и 270°C эквивалентно уменьшению флюенса нейтронов соответственно в 3-5, 5-8, 10-20 раз. Влияние температуры на радиационное изменение карбонатных пород и руд в диапазоне 40-270 °C малозаметно, что позволяет судить о том, что более предпочтительными заполнителями для бетона защиты реакторов АЭС являются карбонатные, основные и ультраосновные магматические породы и руды. [1; 2; 5; 6; 7]

Для повышения радиационной стойкости целесообразно применение литых бетонов и растворов с большой подвижностью и повышенным расходом цемента, так как с увеличением объёма цементного камня в растворе и бетоне при облучении в них преобладают положительные структурные изменения, что повышает прочность и модуль деформаций после облучения; повышению радиационной стойкости системы «бетон-раствор» на радиационно-деформативных заполнителях способствует также снижение крупности заполнителя.

Эффективность поглощения  $\gamma$ -излучения у особотяжёлых бетонов в 1,5 раза выше, чем у обычных, но они дороже в 3-4 раза. Под действием нейтронов в таких бетонах возникает вторичное  $\gamma$ -излучение с высокой энергией, поэтому появляется необходимость

в дополнительной защите или увеличении существующей на 18-20%.

Для улучшения защитных свойств бетонов и растворов рекомендуется вводить в их состав добавки – соли стеариновой и других жирных кислот в количестве 2,5-3,5 % (в частности, соединения свинца, висмута, вольфрама, циркония, железа, олова, кадмия, лития, бария). Такие добавки повышают защитные свойства бетонов по отношению к нейтронному и  $\gamma$ -излучению. [1; 2; 5]

Значительно улучшает защитные свойства бетона наличие в составе поргланцементна бария. Например, слой обычного цементного камня толщиной 10 мм снижает интенсивность потока  $\gamma$ -квантов в 1,52 раза, слой цементного камня с 30% ВаО – в 2 раза, а такой же слой свинца – в 2,65 раза. Моноалюминат бария обладает высокими огнеупорными свойствами и в то же время является воздушным вяжущим веществом. Добавление сульфата кальция придаёт ему гидрофильность, что обуславливает рост прочности цемента при водном твердении. [1]

Для повышения вероятности захвата медленных и тепловых нейтронов (без образования жёсткого  $\gamma$ -излучения захвата) в бетон иногда добавляют соединения бора, например колеманит, датолит, борокальцит.

Бор является эффективным поглотителем нейтронов. Введение его в бетон приводит к уменьшению средней энергии, выделяющейся при захвате нейтронов, более чем в 2 раза и, как следствие, к снижению тепловыделения и перераспределению его по толщине.

Самым выгодным из борсодержащих руд является колеманит, так как он сравнительно дешев и содержит 30 %  $B_2O_3$  и большое количество кристаллизационной воды.

Рекомендуется также добавлять в бетон размолотое стекло пирекс, содержащее 8-12 % оксида бора ( $B_2O_3$ ).

Свойства радиационно-защитных бетонов зависят от вида компонентов, применяемых для их изготовления. Как правило, в названии бетона используется название горной породы заполнителя.

Анализ данных, приведённых в литературе [1-6], позволяет сделать вывод о том, что бетоны и растворы на основе тяжёлых заполнителей из железных руд, хромита, барита, серпентинита обладают достаточно хорошей радиационной стойкостью. Эти бетоны спо-

собны без существенного ухудшения строительно-технических свойств выдерживать длительное действие радиации с интегральным потоком нейтронов до  $5 \cdot 10^{24}$  н/м<sup>2</sup> при рабочих температурах до 500°С. При локальных перегревах такие бетоны устойчивы до 1100°С, хотя и теряют до 70% исходной прочности. Содержание связанной воды после сушки (Т=110°С) – 2-3%, после нагрева до 500°С – 1-1,5%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Комаровский А.Н., Защитные свойства строительных материалов/ А.Н. Комаровский. – М.: Атомиздат, 1971. – 238с.
2. Рояк С.М. Специальные цементы/ С.М. Рояк, Г.С. Рояк. – М.: Стройиздат, 1993.
3. Прошин А.П., Строительные растворы и бетоны для защиты от радиации/ А.П. Прошин, Е.В. Королёв, В.С. Демьянова, П.Г. Комохов. – Пенза: ПГУСА, 2005.
4. Гордон С.С. Структура и свойства тяжёлых бетонов на различных заполнителях/ С.С. Гордон. – М.: Стройиздат, 1969.
5. Дубровский В.Б. Строительные материалы и конструкции защиты от ионизирующих излучений/ В.Б. Дубровский, З. Аблевич. – М.: Стройиздат, 1983.
6. Королев Е.В., Методика и алгоритм синтеза радиационнозащитных материалов нового поколения./ Е.В. Королев, А.П. Самошин, В.А. Смирнов, О.В. Королева, А.П. Гришина – Пенза, ПГУАС, 2009. – 130с.
7. Дубровский В.Б., Строительство атомных электростанций/ В.Б. Дубровский, П.А. Лавданский, И.А. Енговатов – М., Издательство АСВ, 2006 – 332с.
8. Бетон. Том II./ Справочник под ред. П.Г. Комохова. – СПб.: НПО Профессионал. – 2009.
9. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение: учебное пособие для строит. спец. вузов/ И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 2002.