

**Защита строительных материалов от ионизирующего излучения**

Савчик О.М., Савватимов А.Д., Эйсмонт Д.Г.

Научный руководитель – Красулина Л.В.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

На практике использования строительных материалов большое значение имеют условия, в которых будут эксплуатироваться, построенные из них конструкции. Эти условия могут быть различными, например: высокая влажность, большие температурные колебания, разрушающее действие растительных и живых микроорганизмов, химически активных веществ и т.д. С течением времени и ускорением научно-технического прогресса выше изложенный список постоянно обновляется.

В дополнение к существующим агрессивным условиям эксплуатации, которые были ранее изложены, относят влияние ионизирующего излучения на строительные материалы. В данной научной работе мы определим физический смысл ионизирующего излучения, опишем его основные положения, средства защиты.

**Ионизирующее излучение.** Существуют два вида ионизирующих излучений: корпускулярное, состоящее из частиц с массой покоя, отличной от нуля (альфа( $\alpha$ )- и бета( $\beta$ )-излучение и нейтронное излучение) и электромагнитное (гамма( $\gamma$ )-излучение и рентгеновское) с очень малой длиной волны.

**Альфа-лучи.** Этот тип распада обычно наблюдается в тяжелых неустойчивых ядрах. При этом разрушается атомное ядро X ("материнское ядро"), образуется  $\alpha$ -частица и новое ядро Y ("дочернее ядро").  $\alpha$ -частица представляет собой ядро гелия, имеющее 2 протона и 2 нейтрона. Поскольку  $\alpha$ -частица намного больше, чем электрон, и обладает большой кинетической энергией, она практически не отклоняется при столкновении, и ее путь представляет собой почти прямую линию. Этот путь  $\alpha$ -частица и протонов в веществе очень короткий. Проникающая способность  $\alpha$ -частиц небольшая. Они проходят только около 4 см в воздухе и не проникают через лист бумаги и верхние слои клеток кожи человека. Вредное воздействие на организм человека проявляется при нахождении его в зоне действия вещества, излучающего  $\alpha$ -частицы.

**Бета-лучи.**  $\beta$ -распад наблюдается в неустойчивых изотопах более легких ядер (водород, натрий, азот и т.п.).  $\beta$ -частица испускается материнским ядром и образуется дочернее ядро. Бета-лучи представляют собой поток электронов или позитронов, излучаемых ядрами атомов радиоактивных веществ. По сравнению с  $\alpha$ -частицами они обладают большей про-

никающей способностью и поэтому одинаково опасны как при непосредственном прикосновении к излучающему веществу, так и на расстоянии.

**Гамма-лучи.** Характеризуются наименьшей ионизирующей и наибольшей проникающей способностью. Это высокочастотное электромагнитное излучение, возникающее в процессе ядерных реакций или радиоактивного распада. При  $\alpha$ -распаде дочернее ядро может переходить в возбужденное состояние. Электроны занимают более высокие энергетические уровни, которые неустойчивы. Поэтому в течение короткого времени они перемещаются на более низкий энергетический уровень, и избыток энергии испускается в форме  $\gamma$ -лучей, представляющих собой электромагнитные волны или фотоны. Они полностью эквивалентны световым волнам и рентгеновским лучам, которые испускаются возбужденными атомами, но имеют большую энергию. Длина волны  $\gamma$ -лучей короче, чем длина волны рентгеновских лучей.  $\gamma$ -лучи ионизируют вещество, теряя энергию, передавая ее электронам атомов вещества. Они обладают широким диапазоном длин пробега и могут пройти даже через тело человека. Для защиты от  $\gamma$ -лучей, в зависимости от их энергии, требуется толстый экран, сделанный из тяжелого вещества, например свинца.

**Нейтроны.** Нейтроны являются незаряженными частицами и производят ионизацию косвенно, взаимодействуя первоначально с атомными ядрами, а не с электронами. Они обладают широким диапазоном длины пробега в веществе. Нейтроны содержатся в ядрах всех атомов, кроме водорода. Свободные нейтроны получают в ядерных реакциях. Они вылетают из атомного ядра с различными скоростями и энергией. Нейтроны замедляются при столкновениях с ядрами атомов вещества, при этом происходит передача энергии. Возбужденное ядро вещества испускает протон и  $\gamma$ -лучи. Когда энергия нейтрона уменьшается, он захватывается атомным ядром. Нейтронное излучение представляет собой поток ядерных частиц, не имеющих электрического заряда. Масса нейтрона приблизительно в 4 раза меньше массы  $\alpha$ -частиц. В зависимости от энергии различают медленные нейтроны (с энергией менее 1 КэВ), нейтроны промежуточных энергий (от 1 до 500 КэВ) и быстрые нейтроны (от 500 КэВ до 20 МэВ). Среди медленных нейтронов различают тепловые нейтроны с энергией менее 0,2 эВ. Нейтроны замедляются при столкновениях с ядрами атомов вещества, при этом происходит передача энергии. При неупругом взаимодействии нейтронов с ядрами атомов среды возникает вторичное излучение, состоящее из заряженных частиц и  $\gamma$ -лучей (вторичного излучения). При упругих взаимодействиях нейтронов с ядрами может наблюдаться обычная ионизация вещества.

Проникающую способность альфа-излучения, бета-излучения, гамма-квантов, нейтронного излучения можно представить в виде таблицы (табл.1).

**Таблица 1** – Проникающая способность различных видов излучений с энергией в 2 МэВ.

Тип излучения	Длина пробега в воздухе, м
Альфа-излучение	0,01
Бета-излучение	10
Нейтронное излучение	15-120
Гамма-кванты	до 600

**Защита.** Изучая строительные материалы, применяемые для защиты от ионизирующего излучения, наибольшее внимание следует обращать на гамма-лучи и нейтронное излучение. Для их ослабления приходится выполнять защитные экраны значительной толщины. В то время как эффективная защита от альфа- и бета-лучей не является проблемой, вследствие не высокой их проникаемости. К примеру, защита от альфа-излучения достигается применением материалов из обычного или органического стекла толщиной несколько миллиметров, или же достаточно слоя воздуха в несколько сантиметров. Для защиты от бета-излучения конструкции изготавливают из алюминия или пластмассы.

При взаимодействии ионизирующего излучения с материалом возможны разрыв химических связей, образование свободных радикалов и ионов, смещение атомов из равновесного положения в кристаллической решетке. Передача энергии излучения материалу может приводить к нагреву его до высоких температур и оплавлению, переходу из кристаллического состояния в аморфное. Возникающие радиационные дефекты структуры материалов при их облучении приводят к развитию в материалах внутренних напряжений и деформаций, образованию трещин и, в конечном счете, к разрушению. Изменяются также упругие характеристики, температурная деформативность, теплопроводность, плотность и другие свойства.

Для сравнительной оценки защитных свойств материалов используют толщину слоя половинного ослабления  $T_{1/2}=0,693a$ , где  $a$  – длина релаксации, численно равна толщине слоя, который ослабляет поток излучения в  $e=2,178$  раз.

Защитные свойства материалов от нейтронного излучения определяются их замедляющей и поглощающей способностью, степенью активации. Быстрые нейтроны наиболее эффективно замедляются веществами с малым атомным номером, такими как графит и водородсодержащие вещества (легкая и тяжелая вода, пластмассы, полиэтилен, парафин). Для эффективного поглощения тепловых нейтронов применяются элементы с боль-

шим сечением поглощения. К ним относятся В, Cl, Li, Na, Nd, Sm, Eu, Gd. Гамма-излучение наиболее эффективно ослабляется материалами с большим атомным номером и высокой плотностью (свинец, сталь, бетон, магнетитовые и другие руды, свинцовое стекло). Основными защитными материалами являются: вода, железо, свинец, полиэтилен, графит, бетоны. В качестве добавки используют бор.

**Бетон** является основным материалом для защиты от излучений. Бетон является хорошим материалом с точки зрения возможности изменения его свойств — как технических, так и физических (в том числе защитных). Бетоны, применяемые в защитных от радиации целях должны обладать рядом специальных свойств и особенностей, такими как: объём по массе, способность сохранять свои свойства в различных диапазонах температур, наличие химических добавок и т.д. В состав цемента в основном входят окислы кальция, кремния, алюминия, железа и легкие ядра, которые интенсивно поглощают гамма-излучение и замедляют быстрые нейтроны в результате упругого и неупругого столкновений. Ослабление плотности потока нейтронов в бетоне зависит от содержания химически связанной воды в материале защиты, которое определяется в основном типом используемого бетона.

**Вязущие вещества.** В качестве основного вяжущего для защитных бетонов рекомендуется применять портландцемент и его разновидности, марка которого выбирается из условия обеспечения заданной прочности бетона. После облучения прочность алита и белита снижается на 50–60%, содержание воды уменьшается в 3 раза. Для увеличения эффективности защиты против нейтронного излучения рекомендуется применять цементы с большим содержанием алита и белита, а также цементы, образующие гидратные новообразования с большим содержанием химически связанной воды.

**Заполнители.** Для приготовления бетонов применяют крупный и мелкий заполнители различных видов. Выбор заполнителя определяется требованиями, предъявляемыми к бетону, местными условиями и технико-экономическими показателями. В качестве заполнителей применяются: магнетит, гематитовые руды, серпентинит, борокальцид  $B_4S$ , барит, лимонит, ильменит (титанистый железняк)  $FeTiO_3$ .

В зависимости от применяемых заполнителей и условий эксплуатации бетона выделяют его следующие типы.

**Серпентинитовый бетон.** В качестве заполнителя для этого бетона применяется метаморфическая горная порода серпентинит, сложенная в основном минералом класса силикатов — серпентином  $[Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_8]$ . Это плотная порода зеленого цвета различных оттенков, ее плотность 2,4—2,9 г/см<sup>3</sup>, твердость 2,4—3,5 (по шкале Мооса),

прочность 40—60 МПа. Основной причиной применения серпентинита в качестве заполнителя для защитных бетонов является большое содержание химически связанной воды (10—15 % по массе), которая к тому же при нагреве породы заметно теряется лишь при температуре более 450 С. Плотность бетонов, приготовленных на серпентинитовом щебне и песке, составляет 2,2—2,35 г/см<sup>3</sup>

**Железосодержащий бетон.** Для получения бетонов большой плотности в качестве заполнителей используется различная железная руда (железорудный бетон): лимонитовая, магнетитовая, гематитовая. В строительстве атомных электростанций наибольшее применение получили магнетитовая и гематитовая руды. Дроблением и рассевом руды получают песок и щебень, которые используют для приготовления бетонов.

**Полимербетон** – бесцементный бетон на основе полимерного связующего (обычно эпоксидную смолу) и большое количество дисперсного наполнителя (талька, аэросила, толчёного кварца, гранитной крошки и др.). Состав может называться пластоцементом, если количество наполнителя более 50 %.

**Бетон с добавкой бора.** Сечение поглощения тепловых нейтронов изотопа химического элемента В<sup>10</sup> составляет 3838 барн. Поэтому даже небольшое содержание этого изотопа в материале (бетоне) защитного экрана приводит к резкому снижению потоков тепловых и надтепловых нейтронов по сравнению с материалом, где бор отсутствует. При поглощении теплового нейтрона ядром В испускаются гамма-излучение и  $\alpha$ -частицы, а ядро Fe<sup>56</sup> при таком же воздействии испускает фотоны. Очевидно, что при прочих равных условиях в защитном экране из материала, содержащего бор, уровни захватного (вторичного)  $\gamma$ -излучения и радиационного энерговыделения будут ниже, чем в таком же материале, не содержащем бор. В определенных условиях введением бора в защитный бетон можно уменьшить толщину защиты и снизить температуру ее радиационного разогрева.

Известно, что в цементных бетонах количество воды не превышает 20...25% по массе цемента, или 3...4% по массе бетона. Расчеты показывают, что содержание числа ядер водорода в 1 см<sup>3</sup> у полимербетона в 1,5 раза больше, чем цементного бетона. В то же время у полимербетонов содержание полимерного связующего может составлять от 8 до 12% общей массы полимербетона. Это дает основание предполагать высокую эффективность полимербетонов как защитных материалов, они превосходят цементные бетоны по защитным свойствам от излучения в 1,5 раза.

**Влияние облучения на свойства бетонов.** Как уже отмечалось, основными материалами для защитных экранов от ионизирующих излучений являются бетоны. При облучении в структуре бетона и его составляющих образуются радиационные дефекты, накопление которых приводит к изменению физико-технологических свойств каждой из составляющих, а также слагаемой ими системы — бетона. Естественно, что радиационная

стойкость бетона в значительной степени связана с радиационной стойкостью слагающих его составляющих.

**Влияние облучения на свойства вяжущих.** Наибольшее распространение в качестве вяжущего защитных бетонов и растворов получил обычный портландцемент, клинкер которого состоит из минералов: трехкальциевого силиката (алит), двухкальциевого силиката (белит), трехкальциевого алюмината (целит) и четырехкальциевого алюмоферрита (браунмиллерит). После облучения усадка этих гидратированных минералов составляет 0,4 - 0,8 %, прочность алита и белита снижается на 50 - 60 %, а прочность целита и браунмиллерита не изменяется.

**Влияние облучения на содержание воды** в портландцементном камне ( $V/C = 0,38$ ) характеризуется тем, что потери воды в цементном камне после облучения возрастают в 3 раза, что происходит в результате разложения кристаллогидратов и радиолиза воды. Облучение сопровождается выделением газа.

**Влияние облучения на свойства заполнителей.** Необходимо учитывать воздействие нейтронного излучения на свойства заполнителей. Во-первых, при поглощении нейтронов ядрами атомов возможно вторичное  $\gamma$ -излучение. Это особенно характерно для железа. Поэтому железный лом и руды не всегда могут быть использованы. В этом отношении предпочтителен барит, не дающий вторичного  $\gamma$ -излучения. Во-вторых, нейтроны при столкновении с ядрами атомов могут нарушить их равновесное положение в кристаллической решетке. При этом возможно изменение объема и свойств заполнителей. Например, при облучении кварца нейтронами происходит его аморфизация, сопровождающаяся значительным анизотропным расширением, что может привести к разрушению бетона. Данное явление следует учитывать не только при проектировании составов защитных бетонов, но также обычных конструктивных, жаростойких и теплоизоляционных бетонов, применяемых при строительстве ядерных установок.

#### ЛИТЕРАТУРА

Строительство атомных электростанций / В.Б. Дубровский, П.А. Лавданский, И.А. Енговатов. – 2006.