

Оценка радиационных изменений бетонов различных объектов использования атомной энергии под действием гамма-излучения

А.В. Денисов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Выполнены расчетные исследования по оценке радиационных изменений под действием гамма-излучения бетонов конструкций различных помещений объектов использования атомной энергии. Расчеты выполнены с использованием методов, разработанных для аналитического определения радиационных изменений бетонов и их составляющих при нейтронном облучении и нагревании, использование которых было обосновано автором ранее. Основой для расчетов послужили разработанные ранее автором методы прогнозирования радиационных изменений заполнителей и цементного камня под действием гамма-излучения. Установлено, что под действием гамма-излучения у бетонов конструкций рассмотренных помещений различных объектов использования атомной энергии в большинстве случаев происходят, и будут происходить значимые радиационные изменения, особенно прочности. Гамма-излучение вызывает уменьшение объема и снижение прочности, но различное у бетонов разных помещений в зависимости от мощности поглощенной дозы. Радиационные изменения возрастают с увеличением продолжительности эксплуатации. Установленные расчетом радиационные изменения бетонов под действием гамма-излучения должны учитываться при проектировании, эксплуатации и особенно при продлении эксплуатации объектов атомной энергетики. Однако в расчетах не учтено, что изменение прочности может частично компенсироваться дополнительной гидратацией и особенно повышением прочности за счет карбонизации. В связи с этим полученные результаты показывают возможный максимальный эффект влияния гамма-излучения. При получении конкретных данных о влиянии карбонизации представленные результаты могут быть скорректированы.

Ключевые слова: бетоны, объекты использования атомной энергии, АЭС, влияние гамма-излучения, радиационные изменения бетонов, изменение объема, радиационные изменения прочности.

Введение

Из ионизирующих излучений, воздействующих на бетоны конструкций радиационной защиты объектов использования атомной энергии, наиболее значительные радиационные изменения этих бетонов вызывает нейтронное излучение [1 - 3]. В связи с этим влияние нейтронного излучения на бетоны и их составляющие наиболее изучено.

Наибольший объем исследований выполнен в России. Причем были выполнены не только экспериментальные исследования, обобщенные в

работах [4, 5], но и расчетно-теоретические исследования, обобщенные в работе [5]. В результате исследований была не только получена база экспериментальных данных, но разработаны и экспериментально апробированы методы аналитического определения (прогнозирования) радиационных изменений:

а) минералов и цементного камня (затвердевшего в результате гидратации цемента) бетонов - по данным о радиационной нагрузке и условиях облучения [5];

б) материалов заполнителей бетонов и растворов (крупного и мелкого заполнителей) - по данным о радиационных изменениях минералов [5];

в) растворов – по данным о радиационных изменениях мелкого заполнителя (песка) и цементного камня [5 - 7];

г) бетонов – по данным о радиационных изменениях крупного заполнителя (щебня) и раствора [5 - 7].

Последовательное использование этих методов позволяет рассчитывать радиационные изменения бетонов.

Причем было установлено и апробировано, что эти методы могут быть использованы и для аналитического определения термических изменений при воздействии нагревания.

Влияние гамма-излучения на бетоны и их составляющие менее значительно, чем нейтронного излучения, что наглядно показано в работах [1 - 3]. Соизмеримы только величины выделения газов за счет радиолиза воды, содержащейся в бетонах [1, 2].

В связи с этим при воздействии на бетоны смешанного излучения (нейтронного и гамма-излучения), что имеет место у бетонов конструкций радиационной защиты ядерных реакторов, влияние гамма-излучения обычно не учитывается. А влияние гамма-излучения на бетоны конструкций радиационных защит, на которые воздействуют только высокие потоки

гамма-излучения (без нейтронного излучения), обычно не рассматривается (кроме вопросов радиационного разогрева, который вызывается в основном гамма-излучением). В таких условиях эксплуатируются бетоны в помещениях технологического оборудования, бассейнов выдержки и шахты реакторов АЭС, а также в помещениях других объектов использования атомной энергии.

В тоже время результаты исследований бетонов [2, 8, 9] и растворов [10, 11] прошлого века, а также бетонов [12, 13] и растворов [14 - 16] современных исследований показывают, что радиационные изменения бетонов под действием гамма-излучения могут быть значимыми. Хотя в большинстве работ проведены исследования бетонов и растворов молодого возраста, а не зрелого, представляющий наибольший практический интерес. В связи с этим целью настоящей работы является оценка радиационных изменений бетонов конструкций различных объектов атомной энергетики под действием гамма-излучения после различного времени эксплуатации.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выбор методики расчетной оценки радиационных изменений бетонов под действием гамма-излучения.
2. Выделение помещений объектов использования атомной энергии, в которых бетоны конструкций подвержены воздействию наиболее высоких потоков гамма-излучения. Установление максимальных значений действующих на них радиационных нагрузок.
3. Проведение расчетов радиационных изменений бетонов выделенных помещений объектов использования атомной энергии под действием гамма-излучения после различного времени эксплуатации.

Методика исследования

Для расчетной оценки радиационных изменений бетонов под действием гамма-излучения были выбраны и использованы методы,

разработанные для аналитического определения радиационных изменений бетонов и их составляющих при нейтронном облучении и нагревании.

Обоснование применения указанных выше методов б), в) и г) при воздействии гамма-излучения рассматривалось в работах [17, 18]. Отмечено, что использование этих методов допустимо, так как причина изменений не имеет значения, поскольку методы апробированы и при воздействии нейтронов, и при воздействии нагревания. К этому можно добавить, что изменения заполнителей, растворов и бетонов определяются по изменениям их компонентов. И это является дополнительным обоснованием допустимости применения этих методов для оценки радиационных изменений бетонов под действием гамма-излучения.

Значения максимально возможной мощности поглощенной дозы гамма-излучения P_G на бетоны шахт ядерных реакторов, а также максимальные значения P_G на бетоны конструкций различных помещений объектов атомной энергетики принимали по данным работы [5].

Максимальные значения P_G на бетоны шахт реакторов АЭС принимали:

- по данным [19] о дозе за 60 лет эксплуатации, которые должны учитываться и по нормам (СТО 1.1.1.03.001.0911-2012. Бетоны для строительных конструкций радиационной защиты атомных электростанций);
- на основании расчетов с использованием методики, описанной в работе [20] и данных работы [21, 22] по плотности потоков нейтронов, воздействующих на бетоны шахты реакторов Российских АЭС с ВВЭР различной мощности и разных поколений;
- по данным работы [13] для зарубежных АЭС.

Данные о принятых в расчетах максимальных значениях мощности дозы гамма-излучения, воздействующих на бетоны конструкций различных помещений объектов атомной энергетики и о максимальных поглощенных

дозах гама-излучения через 30 лет, 60 лет и 100 лет (при продлении эксплуатации) приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Данные о максимальной мощности дозы гамма-излучения, воздействующего на бетоны конструкций различных помещений объектов использования атомной энергии и о максимальных поглощенных дозах гама-излучения через различное время эксплуатации, используемые в расчетах

Конструкции рассматриваемого помещения	Мощность поглощенной дозы P_G гамма-излучения, Гр/с	Поглощенная доза D_G (Гр) при различном времени эксплуатации		
		30 лет	60 лет	100 лет
Шахта реактора при максимально возможном значении мощности поглощенной дозы гамма излучения по данным работы [5];	$3 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{11}$
Шахта реактора АЭС с реакторами типа ВВЭР нового поколения по данным [19] и СТО 1.1.1.03.001.0911-2012 об условиях эксплуатации радиационной защиты за 60 лет.	$1 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$	$3.3 \cdot 10^9$
Шахта реактора АЭС с ВВЭР-440 на основании расчетов радиационных нагрузок по методике [20] на основании данных [21, 22]	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^9$	$1.7 \cdot 10^9$
Шахта реактора АЭС 3-го поколения с ВВЭР-1000 и поколения 3+ с ВВЭР-1200 (с сухой защитой толщиной 575 мм) на основании расчетов радиационных нагрузок по методике [20] на основании данных [21, 22]	$1.5 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^8$
Шахта реактора зарубежных АЭС зарубежных АЭС по данным [13];	$1.5 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^8$
Шахта реактора АЭС 2-го поколения с ВВЭР-1000 (с сухой защитой толщиной 700-725 мм) на основании расчетов радиационных нагрузок по методике [20] на основании данных [21, 22]	$8 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^8$	$2.7 \cdot 10^8$
Бассейны выдержки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) АЭС по данным [5];	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$
Резервуары хранилищ высоко радиоактивных отходов по данным [5];	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$
Помещения радиоактивного оборудования АЭС по данным [5].	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^5$

При проведении расчетов рассматривали бетоны зрелого возраста (более 8 месяцев) с наиболее типичным относительным объемным содержанием щебня и песка $V_{Щ}=0,45$; $V_{П}=0,25$ соответственно.

Так как с увеличением температуры радиационные изменения бетонов и их составляющих снижаются, а температура нормальной (длительной) эксплуатации конструкций в основном составляет 30 – 60 °С, то в расчетах с запасом принимали, что температура эксплуатации бетонов конструкций составляет 30 °С.

Данные о радиационных изменениях заполнителей принимали по результатам работы [17], в которой получены параметры, необходимые для аналитического определения радиационных изменений минералов и заполнителей. Радиационные изменения цементного камня определяли на основании работы [18] в которых ранее получены выражения для аналитического определения радиационных изменений цементного камня по данным о радиационных нагрузках.

Детальных расчетов радиационных изменений заполнителей не проводили, так как в соответствии с данными работы [17] при большинстве радиационных нагрузок, указанных в таблице 1, их радиационные изменения незначительны и значимы только при $D_G = 3 \cdot 10^{10} - 1 \cdot 10^{11}$ Гр. При этих дозах изменение объема составляет 0,03-0,36%, а остаточная прочность 0,91-0,99. А при меньших дозах - около 0 и 1 соответственно. В связи с этим радиационные изменения заполнителей принимали усредненными по работе [20] и учитывали только при поглощенных дозах $3 \cdot 10^{10} - 1 \cdot 10^{11}$ Гр.

В соответствии с результатами работы [18] радиационные изменения объема цементного камня (усадка) под действием гамма-излучения определяли по формуле:

$$\frac{\Delta V_{\text{ЦК}}}{V_{\text{ЦК}}} = 3K_T a_G D_G^{b_G}, \quad (1)$$

где D_G - поглощенная мощность дозы гамма-излучения, Гр;

$a_G = -0.000894\%$, $b_G = 0.3497$ при D_G в Гр;

K_T - коэффициент влияния температуры на радиационные изменения цементного камня, рассчитываемый по формуле:

$$K_T = 7.77 \cdot 10^{-7} T^2 - 0.0023T + 1.0454 \quad (2)$$

В соответствии с работой [18] изменение прочности цементного камня при сжатии при воздействии гамма-излучения с некоторым запасом без учета влияния карбонизации по данным об изменении объема в виде относительной остаточной величины $\frac{R_{\text{ЦК}}}{R_{\text{ЦК}0}}$ определяли по формуле:

$$\frac{R_{\text{ЦК}}}{R_{\text{ЦК}0}} = \left(A_{\text{ЦК}} + B_{\text{ЦК}} \frac{\Delta V_{\text{ЦК}}}{V_{\text{ЦК}}} \right)^{-1} \quad (3)$$

где $A_{\text{ЦК}}$ и $B_{\text{ЦК}}$ - параметры, значения которых по [6, 7, 21] для бетонов зрелого возраста составляют: $A_{\text{ЦК}} = 1,00$; $B_{\text{ЦК}} = -0,23 \text{ \%}^{-1}$.

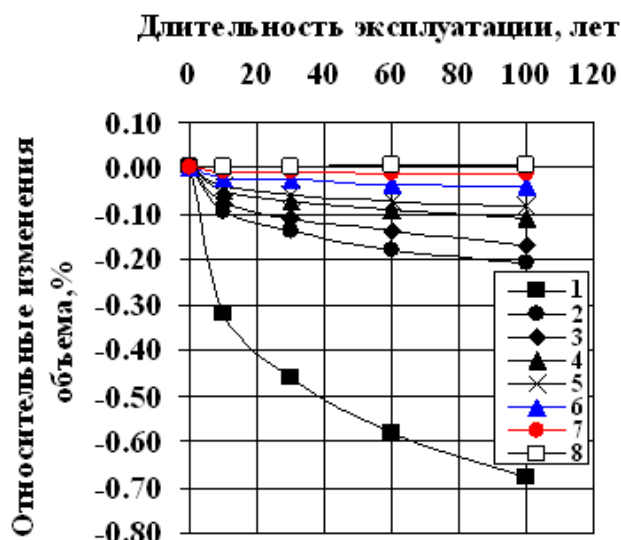
Радиационные изменения растворов в составе бетонов, а затем бетонов в целом определяли по величинам рассчитанных радиационных изменений заполнителей и цементного камня по методам аналитического определения, подробно представленным в работах [5 - 7]. Рассчитывали изменение объема и прочности при сжатии, как наиболее важных последствий влияния облучения.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты расчетов радиационных изменений объема и прочности на сжатие под действием гамма-излучения у бетонов наиболее радиационно нагруженных конструкций различных помещений объектов использования

атомной энергии в зависимости от продолжительности эксплуатации приведены на рисунке 1.

а)



б)

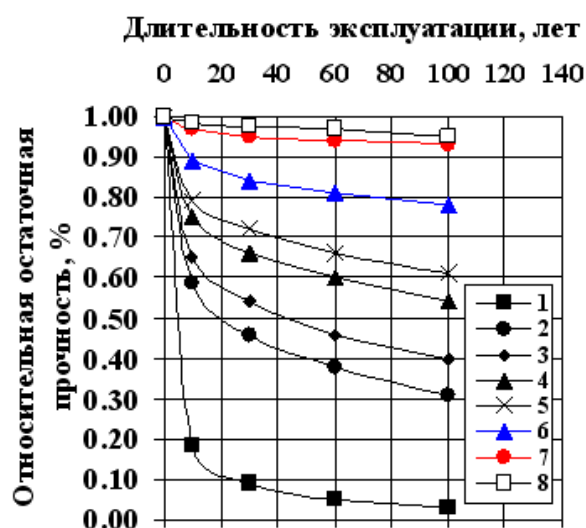


Рисунок 1. Зависимость расчетного радиационного изменения объема (а) и прочности на сжатие (б) под действием гамма-излучения бетонов конструкций различных помещений и объектов использования атомной энергии от продолжительности эксплуатации.

- 1 – Бетон шахты ядерных реакторов при максимально возможном значении мощности поглощенной дозы гамма-излучения по [5];
- 2 – Бетон шахты реактора АЭС с реакторами типа ВВЭР нового поколения при радиационных нагрузках по данным [19] нормативного документа СТО 1.1.1.03.001.0911-2012 об условиях эксплуатации радиационной защиты;
- 3 – Бетон шахты реактора АЭС с ВВЭР-440 при рассчитанных радиационных нагрузках;
- 4 – Бетон шахты реактора АЭС 3-го поколения с ВВЭР-1000, поколения 3+ с ВВЭР-1200 при рассчитанных радиационных нагрузках, а также шахты реактора зарубежных АЭС при радиационных нагрузках по данным [13];
- 5 – Бетон шахты реактора АЭС 2-го поколения с ВВЭР-1000 при рассчитанных радиационных нагрузках;
- 6 – Бетон бассейна выдержки ТВЭЛов при радиационных нагрузках по данным [5];
- 7 – Бетон резервуаров хранилищ высокоактивных жидких радиоактивных отходов при радиационных нагрузках по данным [5];
- 8 – Бетон помещения радиоактивного оборудования АЭС при радиационных нагрузках по данным [5].

Полученные результаты расчетов свидетельствуют о том, что под действием гамма-излучения у бетонов конструкций рассмотренных помещений различных объектом использования атомной энергии в большинстве случаев происходят и будут происходить значимые радиационные изменения. Во всех случаях гамма-излучение вызывает уменьшение объема и снижение прочности, но различное у бетонов разных помещений объектов использования атомной энергии. Радиационные изменения возрастают с увеличением мощности поглощенной дозы гамма-излучения и продолжительности эксплуатации.

Наиболее значительные радиационные изменения происходят у бетонов шахты ядерных реакторов. Хотя они могут быть разными в зависимости от радиационной нагрузки, определяемой мощностью, геометрией и конструктивными особенностями ядерного реактора, а также наличием или отсутствием, материалом и толщиной радиационно-тепловой защиты.

Самые значительные радиационные изменения (уменьшение объема на 0,47 - 0,68 %, снижение прочности до 0,09 – 0,03 от исходной после 30 - 100 лет эксплуатации) ожидаются у бетонов шахты реакторов при максимально возможной мощности поглощенной дозы $3 \cdot 10^1$ Гр/с, если температуры эксплуатации не превысят 60-90 °С.

Радиационные изменения объема бетона при этих условиях относительно не велики. Однако изменения прочности очень значительны (снижение прочности в $1/0,09 - 1/0,03 = 11-33$ раз), что исключает возможность допущения воздействия и действительное наличие таких радиационных нагрузок на бетон шахты реакторов при невысоких температурах. Кроме того на основании расчетов по методу, описанному в работах [27, 28] за счет радиационного разогрева температура бетона стен шахты реактора при таких радиационных нагрузках может достигать многих

сотен °С, что недопустимо ни для бетонов, ни для конструкций шахты реактора.

В связи с этим, рассмотренная на основании работы [5] максимальная мощность дозы гамма-излучения $3 \cdot 10^1$ Гр/с (при указанном диапазоне $3 \cdot 10^{-3}$ - $3 \cdot 10^1$ Гр/с), является сильно завышенной. Такая нагрузка возможна только при отсутствии между корпусом реактора и шахтой радиационно-тепловой защиты. В таком случае такая радиационная нагрузка может рассматриваться только как нагрузка на устанавливаемую в обязательном порядке радиационно-тепловую защиту между корпусом реактора и шахтой.

При более реальных радиационных нагрузках на шахту ядерных реакторов АЭС радиационные изменения бетонов шахты значительно ниже.

При указанных в [19] и СТО 1.1.1.03.001.0911-2012 условиях эксплуатации бетона радиационной защиты АЭС с реакторами типа ВВЭР нового поколения (при мощности поглощенной дозы $1,0 \cdot 10^0$ Гр/с), радиационные изменения бетонов под действием гамма-излучения меньше, чем при максимальной возможной мощности поглощенной дозы. Расчетное уменьшение объема составляет 0,14 - 0,21 %. Расчетное снижение прочности составляет до 0,48 – 0,33 от исходной после 30 - 100 лет эксплуатации.

Несколько меньшие радиационные изменения (уменьшение объема на 0,11 - 0,17 %, снижение прочности до 0,54 – 0,40 от исходной после 30 - 100 лет эксплуатации) по результатам расчетов установлены у бетонов шахты реакторов АЭС с ВВЭР-440 (при мощности поглощенной дозы $5 \cdot 10^{-1}$).

Еще меньшие расчетные радиационные изменения (уменьшение объема на 0,07 - 0,11 %, снижение прочности до 0,66 – 0,54 от исходной после 30 - 100 лет эксплуатации) по результатам расчетов установлены у бетонов шахты реактора АЭС 3-го поколения с ВВЭР-1000, поколения 3+ с ВВЭР-1200, а также шахты реакторов зарубежных АЭС (при мощности поглощенной дозы до $1,5 \cdot 10^{-1}$).

Минимальные расчетные радиационные изменения (уменьшение объема на 0,06 - 0,08 %, снижение прочности до 0,72 – 0,61 от исходной после 30 - 100 лет эксплуатации) установлены у бетонов шахты реактора АЭС 2-го поколения с ВВЭР-1000 при мощности поглощенной дозы $8 \cdot 10^{-2}$.

Установленные радиационные изменения у бетонов шахты реакторов под действием гамма-излучения должны суммироваться с радиационными изменениями под действием нейтронов, показанными в работе [21].

Радиационные изменения бетонов в условиях эксплуатации разных помещений АЭС и других объектов использования атомной энергии значительно ниже, чем в условиях шахты реакторов.

Наибольшие радиационные изменения в других помещениях АЭС и других объектов использования атомной энергии должны происходить у бетонов конструкций бассейнов выдержки ТВЭЛЛОВ при мощности поглощенной дозы до $1 \cdot 10^{-2}$ Гр/с. Расчетное снижение объема в этих условиях составляет 0,03 - 0,04 %. Расчетное уменьшение прочности составляет до 0,84 – 0,78 от исходной после 30 - 100 лет эксплуатации.

Меньшие радиационные изменения должны происходить у бетонов конструкций бетон резервуаров хранилищ высокоактивных жидких радиоактивных отходов при мощности поглощенной дозы до $3 \cdot 10^{-4}$ Гр/с. Расчетное снижение объема составляет 0,008 - 0,013 %. Расчетное уменьшение прочности составляет до 0,95 – 0,93 от исходной после 30 - 100 лет эксплуатации.

Минимальные радиационные изменения должны происходить у бетонов конструкций помещения радиоактивного оборудования АЭС даже при максимальных значениях мощности поглощенной дозы гамма излучения $4 \cdot 10^{-5}$ Гр/с. Расчетное снижение объема составляет 0,004 - 0,009 %. Расчетное уменьшение прочности составляет до 0,98 – 0,95 от исходной после 30 - 100 лет эксплуатации.

Таким образом, радиационные изменения бетонов конструкций различных помещений и объектов использования атомной энергии под действием гамма-излучения, особенно снижение прочности, могут быть значимыми, но различными по величине. Эти изменения должны учитываться при проектировании, эксплуатации и особенно при продлении эксплуатации объектов атомной энергетики. Однако следует иметь в виду, что изменение прочности может частично компенсироваться дополнительной гидратацией и повышением прочности за счет карбонизации, как это показано в [13], что не учтено в расчетах, так как пока не достаточно изучено. В связи с этим полученные результаты показывают возможный максимальный эффект влияния гамма-излучения. При получении конкретных данных о влиянии этих факторов представленные результаты могут быть скорректированы.

Заключение

Результаты расчетов радиационных изменений объема и прочности на сжатие под действием гамма-излучения у бетонов конструкций различных помещений объектов использования атомной энергии в зависимости от продолжительности эксплуатации позволяют сделать следующие выводы:

1. Под действием гамма-излучения у бетонов конструкций рассмотренных помещений различных объектов использования атомной энергии в большинстве случаев происходят и будут происходить значимые радиационные изменения, особенно прочности. Гамма-излучение вызывает уменьшение объема и снижение прочности, но различное у бетонов разных помещений в зависимости от мощности поглощенной дозы. Радиационные изменения возрастают с увеличением продолжительности эксплуатации.

2. Наиболее значительные радиационные изменения под действием гамма-излучения могут происходить у бетонов шахты ядерных реакторов. Хотя они могут быть разными в зависимости от радиационной нагрузки.

Причем при наиболее реальных из рассмотренных радиационных нагрузках после времени эксплуатации от 30 до 100 лет расчетное уменьшение объема составляет от 0,06 - 0,14% до 0,09 - 0,21 %, а снижение прочности от 0,72 - 0,48 до 0,61 – 0,33 от исходной.

3. Наиболее значительные радиационные изменения установлены у бетонов шахты реакторов АЭС с реакторами типа ВВЭР нового поколения при радиационных нагрузках, представленных в нормативных документах на бетоны. Меньшие изменения установлены у бетонов шахты реакторов АЭС с ВВЭР-440. Еще меньшие изменения - у бетонов шахты реактора АЭС 3-го поколения с ВВЭР-1000, поколения 3+ с ВВЭР-1200 а также шахты реакторов зарубежных АЭС. Минимальные радиационные изменения - у бетонов шахты реактора АЭС 2-го поколения с ВВЭР-1000. Установленные радиационные изменения под действием гамма-излучения должны суммироваться с радиационными изменениями под действием нейтронов.

4. Радиационные изменения бетонов под действием гамма-излучения в условиях эксплуатации разных помещений АЭС и других объектов использования атомной энергии значительно ниже, чем в условиях шахты реакторов. В зависимости от величины мощности поглощенной дозы после времени эксплуатации 30 до 100 лет расчетное уменьшение объема составляет от 0,004 - 0,028 до 0,009 - 0,041 %, а снижение прочности от 0,98 - 0,84 до 0,95 – 0,78 от исходной прочности.

Причем наиболее значительные радиационные изменения установлены у бетонов конструкций бассейнов выдержки ТВЭЛЛОВ. Несколько меньшие радиационные изменения - у бетонов резервуаров хранилищ высокоактивных жидких радиоактивных отходов. Минимальные (практически незначительные) радиационные изменения - у бетонов конструкций помещения радиоактивного оборудования АЭС.

5. Установленные расчетом радиационные изменения бетонов под действием гамма-излучения должны учитываться при проектировании, эксплуатации и особенно при продлении эксплуатации объектов атомной энергетики. Однако следует иметь в виду, что изменение прочности может частично компенсироваться дополнительной гидратацией и особенно повышением прочности за счет карбонизации, что не учтено в расчетах, так как пока не достаточно изучено. В связи с этим полученные результаты показывают возможный максимальный эффект влияния гамма-излучения. При получении конкретных данных о влиянии карбонизации представленные результаты могут быть уточнены.

Литература

1. Kelly B., Brocklehurst J., Mottershead D., McNearney S. The Effects of Reactor Radiation on Concrete. Proceedings of the Second Information Meeting on Pre Stress Concrete and Reactor Pressure Vessels and their Thermal Isolation. EUR-4531, 1969. Pp. 237–265.
2. Gray B.S. The Effect of Reactor Radiation on Cements and Concrete. Proceedings of an information exchange meeting on results of concrete irradiation programmes. EUR 4751 f-e Brussels (Belgium), April 19, 1971. Commission of the European Communities, Luxembourg, 1972. Pp. 17-39
3. Field K.G., Remec I., Le Pape Y. Radiation effects in concrete for nuclear power plants – Part I: Quantification of radiation exposure and radiation effects. Nuclear Engineering and Design. 2015. 282. Pp. 126–143.
4. Дубровский В.Б. Радиационная стойкость строительных материалов. М.: Стройиздат, 1977. 278 с.
5. Денисов А. В., Дубровский В.Б., Соловьев В.Н. Радиационная стойкость минеральных и полимерных строительных материалов. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 284 с.

6. Музалевский Л.П., Пергаменщик Б.К. О закономерностях объемных изменений бетона под действием облучения // Сборник трудов МИСИ. 1977. № 146. С. 110-126.

7. Музалевский Л. П. Прогнозирование степени изменения прочности и радиационных деформаций бетона. Труды Третьей Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. Том V. Тбилиси: Из-во ТГУ. 1985, с. 116-125.

8. McDowall D.C. The Effect of Gamma Irradiation on the Creep Properties of Concrete. Proceedings of an information exchange meeting on results of concrete irradiation programmes. EUR 4751 f-e Brussels (Belgium), April 19, 1971. Commission of the European Communities, Luxembourg, 1972. Pp.55-69.

9. Sommers J.F., Gamma radiation damage of structural concrete immersed in water. Health Physics. 1969. 16. Pp. 503–508.

10. Soo P., Milian L. (1989). Sulfate-attack resistance and gamma-irradiation resistance of some portland cement based mortars. Retrieved from URL: nrc.gov/docs/ML1322/ML13222A002.pdf (дата обращения: 22.11.2024)

11. Soo P.; Milian L.M. The effect of gamma radiation on the strength of Portland cement mortars, Journal of Materials Science Letters, 20, 2001, pp. 1345-1348

12. Kitsutaka Y., Matsuzawa K. The effect of gamma radiation on the fracture properties of concrete. Proceedings of FraMCoS-7, May 23-28, 2010. Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - Recent Advances in Fracture Mechanics of Concrete. Korea Concrete Institute, Seoul, ISBN 978-89-5708-180-8. Pp. 61-64.

13. Maruyama I., Kontani O., Takizawa M., Sawada S., Ishikawa S., Yasukouchi J., Sato O., Etoh J., Igari T. Development of the soundness assessment procedure for concrete members affected by neutron and gamma-

irradiation. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2017. 15. Pp. 440–523. DOI:10315/jact.15.440.

14. Khmurovska Y., Štemberk P., Sikorin S., Žák J., Khaladkevich Y., Pavalanski E., & Fatseyeu V. (2019b). Cement mortar creep under exposure to gamma-ray irradiation. *Journal of Nuclear Research and Development*. No 18, Pp. 24–28.

15. Anopko D.V., Honchar O.A., Kochevykh M.O., Kushnierova L.O. Radiation protective properties of fine-grained concretes and their radiation resistance. *Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020)*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020, 907, 1-9, 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/907/1/012031.

16. Hlaváč Z., Blažek J., Sirotenko G. Changes in concrete subjected to neutron irradiation. *Modern Building Materials, Structures and Techniques*. 2023, 99-108. DOI: 10.1007/978-3-031-44603-0_9.

17. Denisov A. V. Radiation changes of concrete aggregates under the influence of gamma radiation. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. No. 4(96). P. 94-109. DOI 10.18720/MCE.96.8.

18. Denisov A. Radiation changes in hardened Portland cement paste under the influence of gamma radiation// *Magazine of Civil Engineering*. 2023. – No. 8(124). DOI 10.34910/MCE.124.3.

19. Поспелов В.П., Миренков А. Ф., Покровский С. Г. Бетоны радиационной защиты атомных станций. (Разработка, исследования, внедрение). М.: ООО «Август Борг», 2006. 652 с.

20. Бушуев Н. И., Денисов А.В., Дубровский В.Б. Коэффициенты накопления нейтронов и захватного гамма-излучения при инженерных расчетах защиты реакторов // *Атомная энергия*, том. 66, 1989. С. 321-324.

21. Денисов А. В. Радиационные изменения бетонов шахты водородных энергетических реакторов при продлении эксплуатации АЭС//



Инженерный вестник Дона, 2023. № 3. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8291/ (дата обращения: 24.11.2024)

22. Денисов А. В. Радиационно-термические изменения серпентинитовых бетонов «сухой» защиты водо-водяных энергетических реакторов АЭС при продлении их эксплуатации// Инженерный вестник Дона. 2024. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9093/ (дата обращения: 24.11.2024)

23. Комаровский А.Н. Строительство ядерных установок. М.: Атомиздат, 1969. 504 с.

24. Агаханов Э.К., Курачев Р.М., Чепурненко А.С., Кулинич И.И. Нелинейная задача теплопроводности для радиационно-теплового экрана реактора АЭС // Инженерный Вестник Дона. 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3417/. (дата обращения: 28.11.2024)

References

1. Kelly B., Brocklehurst J., Mottershead D., McNearney S. The Effects of Reactor Radiation on Concrete. Proceedings of the Second Information Meeting on Pre Stress Concrete and Reactor Pressure Vessels and their Thermal Isolation. EUR-4531, 1969. Pp. 237–265.

2. Gray B.S. The Effect of Reactor Radiation on Cements and Concrete. Proceedings of an information exchange meeting on results of concrete irradiation programmes. EUR 4751 f-e Brussels (Belgium), April 19, 1971. Commission of the European Communities, Luxembourg, 1972. Pp. 17-39

3. Field K.G., Remec I., Le Pape Y. Nuclear Engineering and Design. 2015. 282. Pp. 126–143.

4. Dubrovsky V. B. Radiatsionnaya stoykost stroitelnykh materialov [Radiation Stability of building materials] Moskva: Stroyizdat, 1977. 278 p.

5. Denisov A.V., Dubrovskiy V.B., Solovev V.N. Radiatsionnaya stoykost mineralnyh i polimernykh stroitelnykh materialov [Radiating stability of mineral and polymer building materials]. Moscow: Izdatelskiy dom MEI, 2012. 284 p.

6. Muzalevskiy L.P., Pergamenshchik B.K. O zakonomernostyakh ob`emnykh izmeneniy betona pod deystviem oblucheniya [Regularities of volumetric changes in concrete under the influence of radiation]// Sbornik trudov MISI. 1977. № 146 (kafedra Stroitelstva yadernykh ustanovok). Pp. 110-126. (rus)

7. Muzalevskiy L.P. Prognozirovaniye stepeni izmeneniya prochnosti i radiatsionnykh deformatsiy betona [Forecasting of degree of change of durability and radiating deformations of concrete]. Trudy Tretey Vsesoyuznoy nauchnoy konferencii po zashchite ot ioniziruyushchih izlucheniyy yaderno-tekhnicheskikh ustanovok [Works of the Third All-Union scientific conference on protection from Ionising radiation of Nuclear-technical installations]. Vol. 5. Tbilisi: Iz-vo TGU, 1985. Pp. 116-125.

8. McDowall D.C. The Effect of Gamma Irradiation on the Creep Properties of Concrete. Proceedings of an information exchange meeting on results of concrete irradiation programmes. EUR 4751 f-e Brussels (Belgium), April 19, 1971. Commission of the European Communities, Luxembourg, 1972. Pp.55-69

9. Sommers J.F. Health Physics. 1969. 16. Pp. 503–508.

10. Soo P., Milian L. (1989). Sulfate-attack resistance and gamma-irradiation resistance of some portland cement based mortars. Retrieved from URL: nrc.gov/docs/ML1322/ML13222A002.pdf (date application: 22.11.2024)

11. Soo P., Milian L.M. Journal of Materials Science Letters, 20, 2001, pp. 1345-1348

12. Kitsutaka Y., Matsuzawa K. The effect of gamma radiation on the fracture properties of concrete. Proceedings of FraMCoS-7, May 23-28, 2010. Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - Recent Advances in

Fracture Mechanics of Concrete. Korea Concrete Institute, Seoul, ISBN 978-89-5708-180-8. Pp. 61-64.

13. Maruyama I., Kontani. O., Takizawa M., Sawada S., Ishikawa S., Yasukouchi J., Sato O., Etoh J., Igari T. Journal of Advanced Concrete Technology. 2017, 15. Pp. 440–523. DIO:10315/jact.15.440.

14. Khmurovska Y., Štemberk P., Sikorin S., Žák J., Khaladkevich Y., Pavalanski E., Fatseyeu V. 2019b. 18. Pp. 24–28.

15. Anopko D.V., Honchar O.A., Kochevykh M.O., Kushnierova L.O. Radiation protective properties of fine-grained concretes and their radiation resistance. Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020, 907, 1-9, 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/907/1/012031.

16. Hlaváč Z., Blažek J., Sirotenko G. Changes in concrete subjected to neutron irradiation. Modern Building Materials, Structures and Techniques. 2023, 99-108. DOI: 10.1007/978-3-031-44603-0_9.

17. Denisov A. V. Magazine of Civil Engineering. 2020. No. 4(96). Pp. 94-109. DOI 10.18720/MCE.96.8.

18. Denisov A. Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 8(124). – DOI 10.34910/MCE.124.3.

19. Pospelov V.P., Mirenkov A. F., Pokrovskiy S. G. Betony radiatsionnoy zashchity atomnykh stantsiy. (razrabotka, issledovaniya, vnedreniye) [Concretes of radiation protection of nuclear power plants. (development, research, implementation)]. M.: ООО «Avgust Borg», 2006. 652 p.

20. Bushuyev N. I., Denisov A.V., Dubrovskiy V.B. Atomnaya energiya, tom. 66, 1989. pp. 321-324.

21. Denisov A. V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023. No 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8291/ (date assessed: 24.11.2024)



22. Denisov A. V. Inzhenernyy vestnik Dona. 2024. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3417/ (date assessed: 24.11.2024)

23. Komarovskiy A.N. Stroitelstvo yadernykh ustanovok [Construction of nuclear installations]. M.: Atomizdat, 1969. 504 p.

24. Agakhanov Eh.K., Kurachev R.M., Chepurnenko A.S., Kulinich I.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3417/ (date assessed: 28.11.2024).

Дата поступления: 7.01.2025

Дата публикации: 25.02.2025