

БЕТОН БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ РБМК

В.И. Павленко¹, Ш.М. Рахимбаев¹, В.М. Береснев², Д.А. Колесников³, И.И. Кирияк¹

*¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Белгород, Россия*

E-mail: pavlenko@yandex.ru;

²Научный физико-технологический центр МОНМС и НАН Украины, Харьков, Украина

E-mail: beresnev-scpt@yandex.ua;

³Белгородский государственный университет, Белгород, Россия

E-mail: kolesnikov_d@bsu.edu.ru

Предлагается технологическая разработка недорогого и эффективного бетона на основе железосерпентина для биологической защиты ядерных реакторов типа РБМК АЭС. Приводятся физико-механические характеристики материала по результатам испытаний.

Составной частью любой ядерной установки является биологическая защита. Основное назначение биологической защиты реактора – замедление быстрых нейтронов и поглощение замедлившихся и медленных нейтронов, а также поглощение всех видов γ -излучения как в активной зоне реактора, его технологическом оборудовании, так и в самой защите, для обеспечения безопасных условий работы обслуживающего персонала и исследователей, занятых экспериментами на установке [1, 2].

Многие из требований к материалу биологической защиты – противоречивы. В природе нет материалов, удовлетворяющих сразу всем требованиям. Применяя в защите материал с высокой плотностью, трудно обеспечить высокое содержание в ней лёгких элементов, особенно водорода. Использование водородсодержащих материалов не обеспечивает эффективного ослабления потоков γ -квантов и т. д. Однако в значительной степени всем требованиям удовлетворяют бетоны, особенно, если тщательно и экономически обоснованно выбран их состав. Обычно защитным слоем бетона окружается активная зона реактора и вся система технологического оборудования, являющаяся источником ионизирующего излучения (контуры с теплоносителем, хранилища отработанных твэлов и др.). γ -излучение обычно чаще, чем нейтроны, определяет необходимую толщину бетонной защиты реактора. Задача проектировщиков состоит в правильном выборе толщины и состава бетонной защиты, которая могла бы обеспечить ослабление потоков ионизирующих излучений до безопасного уровня при минимальных затратах на сооружение реакторной установки.

Бетон нашёл широкое применение в качестве материала биологической защиты ядерных реакторов [3, 4] благодаря хорошим защитным и технологическим свойствам и малой стоимости.

Использование бетона даёт два больших преимущества: во-первых, он может быть уложен в любую требуемую форму и во-вторых, защитные свойства бетона можно изменять в довольно широких пределах соответственно предъявляемым требованиям путём подбора его состава.

В зависимости от вида применяемого заполнителя объёмная масса бетона биологической защиты может изменяться от 2200 до 6500 кг/м³ [5].

В связи с произошедшей в стране перестройкой экономических отношений ряд важных технологий, в том числе и в ядерной энергетике, оказался безвозвратно потерян. Для биологической защиты реакторов РБМК выпускался тяжёлый бариевый цемент, производимый из барита. В советское время барит поставлялся из Грузии. В современных условиях из-за упадка экономики в этой стране добыча и поставка барита потребителям прекращены. Кроме того, таможенные пошлины и транспортные расходы на такие дальние перевозки резко поднимут стоимость поставляемого из Грузии барита. Оказалось экономически целесообразнее закупать баритовый цемент в Южной Корее, но, понятно, это не выход из сложившейся ситуации. Встал вопрос о разработке нового состава бетонов для биологической защиты реакторов на основе стандартных портландцементов. Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники (НИКИЭТ) им. Н.А. Доллежала выдал Белгородскому государственному технологическому университету (БГТУ) им. В.Г. Шухова техническое задание на разработку бетона для биологической защиты реакторов типа РБМК: плотность должна быть (4000 \pm 100) кг/м³, содержание воды в бетоне при 300 °С – не менее 1 %, предел прочности при сжатии – более 20 МПа.

Применявшийся ранее железобарий-серпентиновый бетон, аналогичный зарубежному, имел плотность (3800 \pm 100) кг/м³. Замена бариевого цемента на портландцемент приводит к потере плотности железосерпентинового бетона. Требуется введение в такой бетон тяжёлого недефицитного, а следовательно, и недорогого наполнителя, которым, исходя из проведенных на кафедре неорганической химии БГТУ им. В.Г. Шухова научных работ по строительному радиационному материаловедению, является магнетит региона Курской магнитной аномалии (КМА).

Поглощающая способность всевозможных излучений и энергий у материалов различна, следовательно, создание высокоэффективной биологической защиты возможно только при применении соответствующих высокоэффективных поглотителей ионизирующих излучений.

Ослабление потоков γ -квантов и нейтронов происходит в результате взаимодействий с электронами атомов или с ядрами материала защиты. Поглощение всех видов γ -излучения (образующегося при делении ядер топлива в активной зоне реактора; сопровождающего неупругое рассеяние нейтронов; возникающего при захвате тепловых и надтепловых нейтронов ядрами элементов, входящих в состав защиты, активной зоны и конструкций реакторной установки) происходит в результате взаимодействий γ -квантов с атомарными электронами элементов, составляющих защиту. Поэтому для эффективного ослабления потоков нейтронов в состав защиты должны входить материалы с высокой плотностью и большим атомным номером.

Ослабление потоков нейтронов происходит в результате замедления быстрых нейтронов и поглощения замедлившихся или медленных нейтронов. Сечения упругого рассеяния нейтронов высоких энергий ($E_n > 1$ МэВ) элементами с малым атомным номером (следовательно, и их замедляющая способность) малы. Если ввести в защиту элементы со средним и высоким атомным номером, например железо, барий и др., то в результате процессов неупругого рассеяния быстрые нейтроны будут уменьшать свою энергию до таких значений, при которых сечение упругого рассеяния нейтронов – велико. После замедления нейтронов до тепловых энергий они с большой вероятностью поглощаются как ядрами водорода, так и ядрами средних и тяжёлых элементов. Поскольку процесс захвата тепловых и надтепловых нейтронов ядрами практически всех элементов сопровождается образованием γ -излучения, желательно не применять в защите элементов, испускающих γ -кванты высоких энергий и в большом количестве на один захват. Целесообразно вводить в защиту элементы с высоким сечением захвата тепловых и надтепловых нейтронов, который не сопровождается испусканием γ -излучения. В качестве дешёвого тяжелого элемента в защите часто применяют железо (сталь), которое обладает не только высокими защитными свойствами по отношению к γ -излучению, но и по отношению к быстрым нейтронам, поскольку оно имеет большое сечение неупругого рассеяния быстрых нейтронов. Однако у железа есть нежелательное свойство: при захвате тепловых или надтепловых нейтронов испускаются вторичные γ -кванты с высокой энергией.

Для увеличения вероятности захвата тепловых нейтронов без выхода жёсткого γ -излучения желательно в бетон ввести бор в виде малорастворимых в воде соединений. При монтаже толстых монолитных защит необходимости ввода бора в бетон нет [6].

Наиболее эффективным замедлителем тепловых нейтронов является водород, так как уменьшение энергии нейтронов в результате одного столкнове-

ния обратно пропорционально массе сталкивающихся частиц. Вследствие равенства масс нейтрона и ядра водорода – протона – в одном акте рассеяния нейтрона на водороде в среднем теряется половина энергии нейтрона.

Таким образом, высокоэффективный материал защиты реактора должен иметь в своём составе водородсодержащие вещества и тяжёлые элементы, а также, желательно, бор для уменьшения выхода захватного γ -излучения. Все эти вещества могут быть применены в защите как чередующиеся слои, но лучше в виде равномерной смеси. Бетон представляет собой именно такую равномерную смесь из элементов с различными массовыми числами. Водородсодержащим компонентом в бетоне является вода, химически связанная в цементном камне или в заполнителях бетона. Тяжёлые материалы вводятся в бетон или в виде тяжёлого (баритового) цемента, или в виде руд (магнетита, гематита, барита и др.), и в виде металлических заполнителей (дроби и пр.) [6].

Серьезной трудностью эксплуатации бетонной защиты является обеспечение в её составе необходимой концентрации воды, поэтому этот вопрос заслуживает специального обсуждения.

Сотрудниками НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалея показано, что количество воды в бетоне несущественно влияет на ослабление потоков быстрых нейтронов, но сильно влияет на ослабление потоков нейтронов промежуточных энергий. При снижении концентрации воды возрастают длины замедления и диффузии нейтронов, а следствием этого является и увеличение дозового фактора накопления нейтронов. Показано также, что при уменьшении концентрации воды в бетоне происходит накопление в нём замедляющихся нейтронов и увеличение вклада их в суммарную мощность дозы за защитой из бетона.

Для бетонов, используемых в ядерной технике, водоцементное отношение составляет 0,6...0,85 при потребности на гидратацию цемента ~ 30 % воды. Избыточная, химически не связанная цементом, вода при нагревании цементного камня свыше 100 °С начинает удаляться. Потери резко возрастают при температурах 300...400 °С. Для сохранения в процессе эксплуатации воды в бетоне можно применять специальные системы охлаждения бетона, но проще и дешевле использовать в качестве защиты специальный бетон, содержащий воду в составе заполнителя в химически связанном виде. Потеря воды при эксплуатации особенно опасна для тяжёлых бетонов с железосодержащим заполнителем, так как это может привести к очень большому накоплению промежуточных нейтронов в толстой бетонной защите, и защита сама станет источником ионизирующих излучений.

Заполнители защитных бетонов не должны содержать агрессивные элементы, они должны быть доступны в больших количествах и содержать ≥ 9 мас.% структурной высокотемпературной (неудаляющейся до 300 °С) воды [5]. К основным минералам и породам, удовлетворяющим указанным требованиям, можно отнести: ашарит, гидроборцит, пандермит, колеманит, брусит, серпентин, као-

линит, пирофиллит, пеннин, дунит, талькохлорит, талькомагнезит [7].

Минералы: ашарит, гидроборацит, пандермит и колеманит, кроме связанной воды содержат бор, эффективно поглощающий тепловые нейтроны [5]. Из перечисленных минералов на сегодняшний день наиболее оптимален по технико-экономическим показателям серпентин. В Российской Федерации запасы серпентинита практически неисчерпаемы. Группа серпентина включает [7]: антигорит, лизардит и волокнистую разновидность – хризотил. Они имеют одинаковый химический состав и содержат 12...14 мас.% высокотемпературной структурной воды и отличаются только строением кристаллической решётки.

В серпентиновом бетоне вода длительно сохраняется при температурах до 500 °С без специального охлаждения. Этот материал высокотемпературной биологической защиты описан во многих работах [8 и др.]. Для повышения защитных свойств серпентинового бетона в него вводят железо. Тяжёлый железосерпентиновый бетон обладает повышенными защитными свойствами и сохраняет работоспособность при высоких температурах [9].

Исходя из вышесказанного, недорогой, но эффективный бетон для биологической защиты реактора должен содержать в своём составе железо (для замедления быстрых нейтронов и поглощения γ -квантов), наполнитель с высокотемпературной структурной водой (для поглощения замедленных тепловых нейтронов), вяжущие и технологические добавки, обеспечивающие требуемое техническим заданием качество.

Нами разработана технология железомagnetито-серпентино-цементного (ЖМСЦ) бетона и вся необходимая нормативно-техническая документация. Выпущена промышленная партия изделий из ЖМСЦ-бетона. Готовые блоки радиационной защиты принимают в соответствии с ТУ 95.5088-78 «Настил плитный РБМК15. Сб-11».

В лабораторных условиях получены образцы $^{28}R_{сж}$ до 100 МПа и $^{28}R_{изг}$ до 10 МПа. В производственных условиях из-за недостаточно качественной гомогенизации смеси в промышленных бетоносмесителях прочность бетона на сжатие меньше на 30...50 %, но это значительно выше, чем у имеющихся аналогов.

ВЫВОДЫ

ЖМСЦ-бетон является эффективным защитным материалом биологической защиты как по отношению к потокам нейтронов, так и к потокам γ -квантов, и может применяться в блоках радиационной защиты Сб-11 реактора РБМК при температурах до 573 К (300 °С) в атмосфере пароводяной смеси. Из этого бетона можно изготавливать различные изделия на типовых заводах ЖБИ.

Экспериментальные испытания ЖМСЦ-бетона полностью подтвердили его высокие защитные свойства, полученные ранее расчётным путём. Новый материал не уступает по всем своим параметрам ранее используемому материалу ЖБСЦК, а по прочностным – превосходит аналоги.

Полученные экспериментальные и расчётные данные можно применять при конструировании радиационной защиты реакторов различного назначения с рабочей температурой до 573 К (300 °С).

Удельная эффективная активность естественных радионуклидов ЖМСЦ-бетона составляет $19,5 \ll 370$ Бк/кг предельно допустимого значения, т. е. не представляет никакой радиационной опасности при применении его в народном хозяйстве, и по своей естественной активности рекомендуется для неограниченного применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И.Э. Бронштейн. *Радиационная безопасность персонала атомных электростанций*. Л., 1988, 77 с.
2. В.Ф. Козлов, Г.В. Шишкин. *Радиационная безопасность ядерных критических сборок*. М.: «Атомиздат», 1969, 178 с.
3. *Бетон в защите ядерных установок*. М.: «Атомиздат», 1973, 319 с.
4. *Бетон для биологической защиты*. М.: Московский филиал «Оргэнергострой», 1963, 270 с.
5. *Биологическая защита ядерных реакторов: Справочник / Сокр. пер. с англ. / Под ред. Ю.А. Егорова*. М.: «Атомиздат», 1965, 328 с.
6. А.Н. Комаровский. *Строительство ядерных установок*. М.: «Атомиздат», 1969, 503 с.
7. А.А. Годовиков. *Минералогия*. М.: «Недра», 1983, 647 с.
8. Л.Р. Кимель, В.П. Машкович. *Защита от ионизирующих излучений: Справочник*. М.: «Атомиздат», 1972, 312 с.
9. *Защита от излучений атомно-энергетических установок*. М.: «Атомиздат», 1990, 352 с.

Статья поступила в редакцию 17.08.2011 г.

БЕТОН БІОЛОГІЧНОГО ЗАХИСТУ ДЛЯ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ РВПК

В.І. Павленко, Ш.М. Рахімбаєв, В.М. Береснев, Д.О. Колесніков, І.І. Кіряк

Пропонується технологічна розробка відносно дешевого та ефективного бетону на основі залізо-серпентину для біологічного захисту реакторів типу РВПК АЕС. Наводяться фізико-механічні характеристики матеріалу за результатами випробувань.

CONCRETE OF BIOLOGICAL SHIELDING FOR NUCLEAR REACTORS RBPC

V.I. Pavlenko, S.M. Rakhimbayev, V.M. Beresnev, D.A. Kolesnikov, I.I. Kiriya

Technological development of inexpensive and effective concrete based on iron-serpentine for biological shielding of nuclear reactors RBPC APP is proposed. The physical and mechanical characteristics of the material on the test results are presented.