

# РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЙ КОНСТРУКЦИОННЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЗАЩИТЫ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ АЭС И ХРАНИЛИЩ СРЕДНЕАКТИВНЫХ РАО

*Р.Н. Ястребинский, В.И. Павленко, А.В. Ястребинская,  
Н.И. Черкашина, А.А. Карнаухов*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
Белгород, Россия  
E-mail: yrndo@mail.ru*

Представлены результаты исследований радиационно-защитных свойств разработанного железо-магнетито-серпентинитового цементного бетона (ЖМСЦБ) при воздействии нейтронного излучения реактора в сравнении с используемым в настоящее время для реакторной защиты железо-барий-серпентинитовым цементным камнем (ЖБСЦК). Расчетные исследования показали, что материал ЖМСЦБ по основным защитным характеристикам на 15...20% превосходит ЖБСЦК. Экспериментальные испытания разработанного тяжелого бетона ЖМСЦБ подтвердили его высокие радиационно-защитные свойства, полученные расчетным путем. Анализ полученных радиационно-защитных свойств бетона позволяет рекомендовать ЖМСЦБ для его широкого применения в качестве биологической и радиационной защиты на объектах ядерно-энергетического комплекса.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из первоочередных задач обеспечения безопасности эксплуатации АЭС является модернизация и реконструкция энергоблоков, продление сроков их эксплуатации. В соответствии с повышенными требованиями МАГАТЭ по радиационной безопасности в настоящее время ведутся разработки новых радиационно-защитных композиционных материалов, в том числе на основе тяжёлых бетонов. Бетон нашёл широкое применение в качестве материала биологической защиты ядерных реакторов [1, 2] благодаря хорошим защитным, технологическим и экономическим показателям.

Из-за отсутствия сырьевой базы применяемый ранее в блоках радиационной защиты реакторов железо-барий-серпентинитовый цементный камень (ЖБСЦК) в настоящее время не производится. Кроме того, он не удовлетворяет современным требованиям по физико-техническим и радиационно-защитным характеристикам. В связи с этим, в настоящее время действующие АЭС остро ставят вопрос о возобновлении производства тяжелого защитного бетона с более высокими радиационно-защитными и эксплуатационными характеристиками для осуществления ремонта вышедших из строя блоков серии сб. 11.

Для поддержания нормальных условий эксплуатации реакторов типа РБМК и ВВЭР АЭС требуются бетоны с высокой поглощающей способностью гамма- и нейтронного излучений и возможностью длительной эксплуатации при температуре 300 °С [3, 4]. Основным недостатком известных защитных бетонов – низкая теплопроводность, затрудняющая отвод выделяемого в защите тепла; сравнительно низкие физико-механические показатели; недостаточно

высокая радиационная стойкость при повышенных температурах (300 °С) по отношению к  $\gamma$ -излучению высоких энергий и большой мощности дозы (2 Мрад/ч); высокий уровень газовыделения (включая водород) за счет повышенного содержания связанной воды – до 140 л/м<sup>3</sup> бетона и ее радиолиза.

По заданию Концерна «Росэнергоатом» в Белгородском государственном технологическом университете имени В.Г. Шухова совместно с ОАО «НИКИЭТ имени Н.А. Доллежала» (г. Москва) разработан радиационно-стойкий конструкционный композиционный материал нового поколения для защиты атомных реакторов АЭС с РБМК и ВВЭР, гамма-установок и хранилищ среднеактивных РАО [3–5]. Разработанный авторами материал ЖМСЦБ, соответствует всем современным требованиям МАГАТЭ и по ряду радиационно-защитных и эксплуатационных свойств превосходит известные российские и зарубежные аналоги, в том числе ЖБСЦК.

В работе представлены результаты исследований радиационно-защитных свойств разработанного ЖМСЦБ при воздействии нейтронного излучения реактора в сравнении с используемым в настоящее время для реакторной защиты ЖБСЦК.

ЖМСЦБ изготавливается из однородной пластифицированной смеси портландцемента, добавок с химически связанной водой (серпентина и др.), активированного железорудного наполнителя на основе магнетита и железной дроби. Испытания проводили на материале, предварительно термообработанном в рабочих условиях при 300 °С.

Химические составы материалов ЖМСЦБ и ЖБСЦК, термообработанных до постоянной массы при температуре 300 °С, представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Химический состав ЖМСЦБ и ЖБСЦК после термообработки при 300 °С, мас. %

Оксиды	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	Fe	BaO
ЖМСЦБ	3,19	0,61	11,56	9,01	0,53	0,25	1,78	73,07	–
ЖБСЦК	3,91	0,38	1,09	0,82	2,33	1,25	0,59	60,67	28,96

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментального определения защитных характеристик бетона от нейтронного излучения использован точечный полоний-бериллиевый источник быстрых нейтронов, активность которого составляла  $Q = 5,67 \cdot 10^6$  нейтр./с. При проведении исследований в экспериментах были использованы сцинтилляционные счетчики быстрых нейтронов на основе кристалла ZnS(Ag) и тепловых нейтронов.

Функции ослабления плотности потоков быстрых нейтронов измерены в условиях «барьерной» геометрии. Для исключения вклада в показания детекторов рассеянного излучения исследуемые образцы были защищены специальным экраном из полиэтилена толщиной 8 см.

Функции ослабления плотности потоков тепловых нейтронов измерены в условиях, когда между источником нейтронов Po-Be и первым слоем исследуемого материала размещали полиэтиленовый замедлитель толщиной 8 см. Быстрые нейтроны Po-Be-источника при прохождении этого замедлителя создавали на его наружной стороне источник тепловых нейтронов. Детектор на первых слоях регистрировал тепловые нейтроны от этого источника, а затем – тепловые нейтроны, образовавшиеся в исследуемых образцах бетона при замедлении быстрых нейтронов.

В процессе исследований детектор тепловых нейтронов устанавливался вплотную к исследуемому слою. Фактор геометрического ослабления тепловых нейтронов был принят в виде  $1/r$ , где  $r$  – расстояние между Po-Be-источником и детектором тепловых нейтронов.

Для вариантных расчётов и получения пространственно-энергетических распределений потоков нейтронов в рассматриваемых материалах защиты были использованы композиции, состоящие из активной зоны реактора, конструктивных элементов реактора и отражателя, слоя серпентинитового бетона толщиной 50 см и слоя исследуемого защитного материала (ЖМСЦБ и ЖБСЦК) толщиной 1 м. Базовая толщина исследуемого материала принята равной 1 м, чтобы исключить граничный эффект на внешней поверхности защиты.

Для анализа радиационно-защитных свойств разработанного бетона применялись теоретические методы расчета прохождения излучения через вещество [6]. Расчеты проводились по программе ANISN [7], реализующей решение одномерного транспортного уравнения методом дискретных

ординат с учётом анизотропии рассеяния. Спектр нейтронов рассчитывался для 12-группового разбиения энергетического интервала [8–10].

По программе ANISN в плоской геометрии в композициях с исследуемыми материалами были рассчитаны пространственно-энергетические распределения плотностей потоков и распределения мощности дозы нейтронов. Для проведения сравнения защитных свойств материалов все расчётные варианты нормированы на одну и ту же мощность реактора.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчета показаны в экспоненциальном формате на рис. 1 и 2.

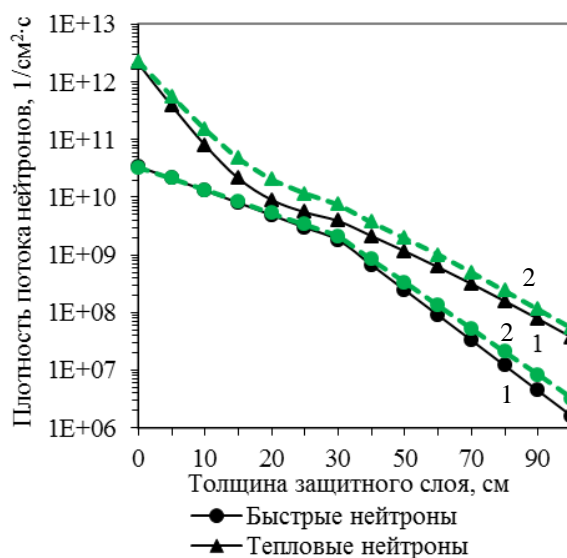


Рис. 1. Расчетные функции распределения плотности потока тепловых и быстрых нейтронов в ЖМСЦБ (1) и ЖБСЦК (2)

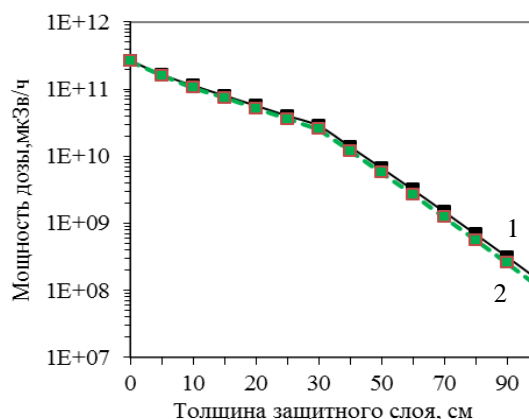


Рис. 2. Расчетная функция распределения мощности дозы нейтронного излучения в ЖМСЦБ (1) и ЖБСЦК (2)

Для сравнения ослабляющих свойств материалов были рассчитаны теоретические сечения выведения быстрых нейтронов и сечения выведения для ряда функционалов, рассчитанных по программе ANISN. Результаты расчета представлены в табл. 2–4 (там же приведены длины релаксации как обратные значения величинам сечений выведения).

Таблица 2  
Сечения выведения ( $\sigma_b$ ) и длины релаксации ( $\lambda_{б.н.}$ ) быстрых нейтронов

Материал	ЖМСЦБ	ЖБСЦК
$\sigma_b, \text{см}^{-1}$	0,0971	0,0855
$\lambda_{б.н.}, \text{см}$	10,29	11,70

Таблица 3  
Сечения выведения для функционалов,  $\text{см}^{-1}$

Функционал	ЖМСЦБ	ЖБСЦК
Плотность потока быстрых нейтронов ( $E > 2 \text{ МэВ}$ )	0,1069	0,0924
Плотность потока тепловых нейтронов (толщина защитного слоя $h = 30 \dots 100 \text{ см}$ )	0,0866	0,0703
Мощность дозы нейтронов	0,0932	0,0772

Таблица 4  
Длины релаксации для функционалов, см

Функционал	ЖМСЦБ	ЖБСЦК
Плотность потока быстрых нейтронов ( $E > 2 \text{ МэВ}$ )	9,36	10,83
Плотность потока тепловых нейтронов (толщина защитного слоя $h = 30 \dots 100 \text{ см}$ )	11,55	14,22
Мощность дозы нейтронов	10,72	12,95

Для тепловых нейтронов сечения выведения и длины релаксации определены для области установления стационарного состояния, когда кривая ослабления плотности потока выходит на экспоненту. В данном случае это происходит начиная, примерно, с толщины  $h = 30 \text{ см}$ .

Как видно из данных, приведенных в табл. 2–4 и на рис. 1, 2, материал ЖМСЦБ по своим защитным свойствам по отношению к нейтронному излучению превосходит материал ЖБСЦК. Это связано с тем, что в материале ЖМСЦБ содержится больше, чем в ЖБСЦК связанной воды. Длина релаксации быстрых нейтронов и мощности дозы нейтронов в материале ЖМСЦБ на 15...20% меньше, чем в ЖБСЦК. Поэтому при замене блоков из ЖБСЦК в сборках серии сб. 11 реактора РБМК на блоки из материала ЖМСЦБ на настиле плиты реактора мощность дозы нейтронов может снизиться в 1,5–2 раза.

Результаты, полученные при экспериментальном исследовании материала ЖМСЦБ, показали, что плотность потока быстрых нейтронов в бетоне уменьшается по экспоненциальному закону с длиной релаксации  $\lambda_{б.н.} = (9,8 \pm 0,1) \text{ см}$  (рис. 3). Плотность потока тепловых нейтронов в первых слоях (до  $\sim 12 \text{ см}$ ) защитного бетона изменяется более резко, по сравнению с быстрыми нейтронами. При толщине защиты более 12 см ослабление плотности потока тепловых нейтронов происходит одинаково с быстрыми нейтронами с длиной релаксации  $\lambda_{т.н.} = (9,8 \pm 0,1) \text{ см}$ , т. е. в материале не происходит накопление тепловых и промежуточных нейтронов.

Анализ полученных экспериментальных результатов нейтронозащитных свойств материала

ЖМСЦБ согласуется с теоретически рассчитанными по программе ANISN.

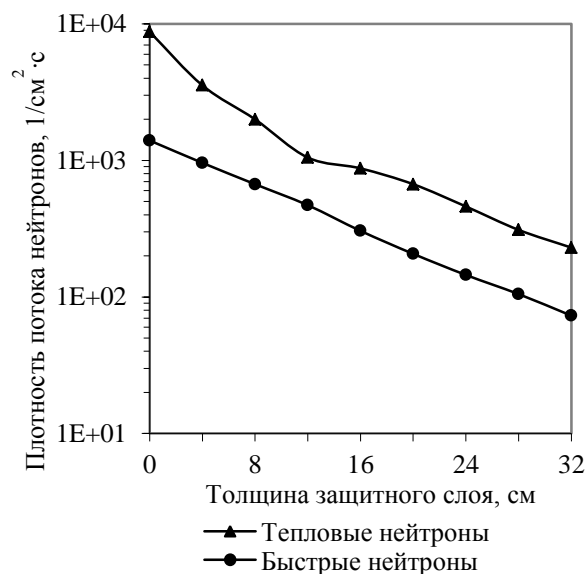


Рис. 3. Функции распределения плотности потоков тепловых и быстрых нейтронов в ЖМСЦБ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены сравнительные расчетные исследования защитных свойств ЖБСЦК, используемого в настоящее время в сборках серии сб. 11 реакторов РБМК, и разработанного альтернативного материала на основе ЖМСЦБ.

Расчетные исследования показали, что ЖМСЦБ по основным защитным характеристикам превосходит ЖБСЦК. Так, величины длин релаксаций для функционалов нейтронного излучения в материале ЖМСЦБ на 15...20% меньше, чем в ЖБСЦК.

Экспериментальные испытания разработанного тяжелого бетона (ЖМСЦБ) подтвердили его высокие радиационно-защитные свойства, полученные расчетным путем.

Анализ полученных радиационно-защитных свойств бетона позволяет рекомендовать ЖМСЦБ для его широкого применения в качестве биологической и радиационной защиты на объектах ядерно-энергетического комплекса. Высокие нейтронозащитные свойства ЖМСЦБ позволяют в 1,5–2 раза снизить мощность дозы нейтронов на настиле плит реактора при замене существующих реакторных сборок серии сб. 11, заполненных ЖБСЦК.

Исследования проводились при поддержке базовой части Государственного задания Минобрнауки РФ №1300.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ю.А. Егоров, В.П. Машкович, Ю.В. Панкратьев, С.Г. Цыпин. *Радиационная безопасность и защита АЭС*. М.: «Атомиздат», 1977, в. 3, 232 с.
- Д.Л. Бродер, Л.Н. Зайцев, М.М. Комочков, Б.С. Сычев, В.В. Мальков. *Бетон в защите ядерных установок*. М.: «Атомиздат», 1973, 257 с.

3. В.И. Павленко, И.С. Епифановский, Р.Н. Ястребинский. Радиационно-защитный бетон для биологической защиты ядерных реакторов // *Перспективные материалы*. 2006, №3, с. 22.
4. В.И. Павленко, А.А. Смоликов, Р.Н. Ястребинский, С.В. Дегтярев, Ю.В. Панкратьев, Ю.В. Орлов. Радиационно-защитный бетон для АЭС с РБМК на основе железо-серпентинитовых композиций с цементным связующим // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2004, №8, с. 66.
5. Р.Н. Ястребинский, В.И. Павленко, А.В. Ястребинская. Радиационно-защитные методы переработки и кондиционирования РАО АЭС // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2013, №2(84), с. 90.
6. V.I. Pavlenko, O.D. Edamenko, N.I. Cherkashina, A.V. Noskov. Total Energy Losses of Relativistic Electrons Passing through a Polymer Composite // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2014, v. 8, N 2, p. 398.
7. Программа ANISN: Руководство пользователя. М: «ИАЭ им. И.В. Курчатова», 1981, 68 с.
8. В.Н. Алёшечкин. Систематический выбор длин свободного пробега в решении задачи глубокого прохождения излучения методом Монте-Карло. Обнинск, 1986, 14 с.
9. Погрешности расчётов защиты от излучений. М.: «Энергоиздат», 1983, 175 с.
10. Активные алгоритмы расчёта прохождения нерассеянного излучения в защите. Обнинск, 1984, 29 с.

*Статья поступила в редакцию 22.07.2014 г.*

## **РАДІАЦІЙНО-СТІЙКИЙ КОНСТРУКЦІЙНИЙ КОМПОЗИЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ ДЛЯ ЗАХИСТУ АТОМНИХ РЕАКТОРІВ АЕС ТА СХОВИЩ СЕРЕДНЬОАКТИВНИХ РАО**

*Р.М. Ястребинський, В.І. Павленко, А.В. Ястребинська, Н.І. Черкашина, А.А. Карнаухов*

Представлено результати досліджень радіаційно-захисних властивостей розробленого залізо-магнетито-серпентинітового цементного бетону (ЗМСЦБ) при впливі нейтронного випромінювання реактора в порівнянні з використовуваним у даний час для реакторного захисту залізо-барій-серпентинітового цементного каменя (ЗБСЦК). Розрахункові дослідження показали, що матеріал ЗМСЦБ за основними захисними характеристиками на 15...20% перевершує ЗБСЦК. Експериментальні випробування розробленого важкого ЗМСЦБ підтвердили його високі радіаційно-захисні властивості, отримані розрахунковим шляхом. Аналіз отриманих радіаційно-захисних властивостей бетону дозволяє рекомендувати ЗМСЦБ для його широкого застосування в якості біологічного та радіаційного захисту на об'єктах ядерно-енергетичного комплексу.

## **RADIATION-RESISTANT STRUCTURAL COMPOSITE MATERIAL TO PROTECT NUCLEAR REACTORS NUCLEAR POWER PLANT AND STORAGE OF INTERMEDIATE- LEVEL RADIOACTIVE WASTE**

*R.M. Yastrebinsky, V.I. Pavlenko, A.V. Yastrebinskaya, N.I. Cherkashina, A.A. Karnauhov*

The paper presents the results of studies of radiation-protective properties of iron-magnetite-serpentine cement concrete (IMSCC) reactor neutron radiation exposure compared with currently used for reactor protection iron-barium-serpentine cement concrete (IBSCC). Calculations have shown that the material IMSCC for basic protective features on 15...20% is superior to IBSCC. Pilot test of heavy concrete IMSCC confirmed his high radiation-protective properties, obtained by calculation. Analysis of radiation-protective properties of concrete allows to recommend IMSCC for wide use as biological and radiation protection at nuclear-power complex.