

Жаростойкий пенобетон с радиационно-защитными свойствами

УДК 691.327

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0023>

Номер статьи: C0023

Сычева Анастасия Максимовна

д-р техн. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
зав. кафедрой «Строительные материалы и технологии»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9093-5541

amsychova@yandex.ru

Титова Тамила Семеновна

д-р техн. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
первый проректор — проректор по научной работе, зав. кафедрой «Техносферная и
экологическая безопасность»

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 1558-5811

titova@pgups.ru

Майер Виктория Александровна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
ассистент

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 4024-0449

vmaier@pgups.ru

Статья получена: 04.11.2025. Одобрена: 20.11.2025. Опубликовано онлайн: 25.12.2025. © РИОР

Аннотация. В условиях развития атомной энергетики возрастает потребность в строительных материалах нового поколения, способных одновременно выполнять функции тепловой и радиационной защиты при сниженной массе и улучшенных эксплуатационных характеристиках. Настоящая работа посвящена разработке методики синтеза жаростойкого пенобетона с комплексом радиационно-защитных и теплофизических свойств, ориентированной на применение в ограждающих и технологических конструкциях ядерно-энергетических установок. Показано, что сочетание функционализированной пены с тяжёлыми наполнителями и водосодержащими компонентами может обеспечивать ослабление γ - и нейтронного излучения при одновременном снижении теплопроводности и плотности материала.

Ключевые слова: пенобетон, жаростойкость, радиационная защита, теплозащитные свойства, строительные материалы, атомная энергетика.

Heat-resistant foam concrete with radiation-shielding properties

Sycheva Anastasiia Maksimovna

Dr. tech. Sciences, Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Head of the Department of Construction Materials and Technologies
Saint Petersburg, Russia
amsychova@yandex.ru

Titova Tamila

Dr. tech. Sciences, Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
First Vice-Rector - Vice-Rector for Research, Head of the Department of Technosphere and
Environmental Safety
Saint Petersburg, Russia
titova@pgups.ru

Maier Viktoriia Alexandrovna

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
assistant
Saint Petersburg, Russia
vmaier@pgups.ru

Abstract. In the context of the development of nuclear power engineering, there is an increasing demand for next-generation building materials capable of simultaneously providing thermal and radiation protection while maintaining reduced weight and improved performance characteristics. This study is devoted to the development of a synthesis methodology for heat-resistant foam concrete that combines radiation-shielding and thermophysical properties, intended for use in enclosure and technological structures of nuclear power facilities. It is demonstrated that the combination of functionalized foam with heavy fillers and water-containing components can ensure attenuation of γ - and neutron radiation while simultaneously reducing the thermal conductivity and density of the material.

Keywords: foam concrete, heat resistance, radiation shielding, thermal insulation properties, building materials, nuclear power engineering.

Введение

Современные сооружения атомной энергетики и объекты с повышенной радиационной нагрузкой требуют материалов, совмещающих низкую теплопроводность, жаростойкость и эффективную радиационную защиту при минимальной массе. Традиционные тяжёлые радиационно-защитные бетоны (на барите, магнетите, оксидах тяжёлых металлов) обеспечивают высокий уровень ослабления гамма- и нейтронного излучения, но их высокая плотность (2200–3500 кг/м³) резко увеличивает массу и конструктивные нагрузки, а также усложняет монтаж и эксплуатацию [1–4]. В противоположность этому, пенобетон (600–900 кг/м³) имеет выгодные теплофизические характеристики, однако в исходном виде обладает недостаточной радиационной стойкостью для применения в ядерной технике. Поэтому задача создать многофункциональный пенобетон, сохраняющий низкую плотность и одновременно выполняющий радиационно-защитную функцию остаётся актуальной и технологически значимой.

Основная гипотеза настоящего исследования заключается в том, что выполнение радиационно-защитной функции материалом с пониженной плотностью возможно, если

необходимые компоненты вводятся не только через цементный камень, но и через пенную плёнку, которая является наиболее плотной частью структуры и играет ключевую роль в формировании свойств, поскольку суммарный объём пленочной фазы в пенобетонной матрице велик. Усиление и стабилизация этой пленки позволяет нивелировать присутствие воздуха, повысить плотность локальных зон и тем самым улучшить как тепловые, так и радиационные характеристики материала.

Защитный эффект будет достигаться не только за счет толщины слоя материала, но и за счет его структуры. Плотность мы снижаем, но за счет качественной, стабилизированной и уплотнённой пенной пленки. Методический подход к разработке радиационно-защитного пенобетона основан на интеграции двух научно-технических решений:

1. Модификация структуры пенной пленки. Введение наночастиц алюминия, кремния и оксида висмута в оболочку газовых пузырьков позволяет увеличить плотность пленки и создать барьер для гамма-излучения. Одновременно использование водосодержащих полимеров и бора повышает эффективность замедления и поглощения нейтронов.

2. Сочетание каменного каркаса и функционализированной пены. Каменный каркас бетона насыщается тяжёлыми минералами и гидросиликатами кальция, обеспечивающими классическую γ -защиту (Рис. 1).

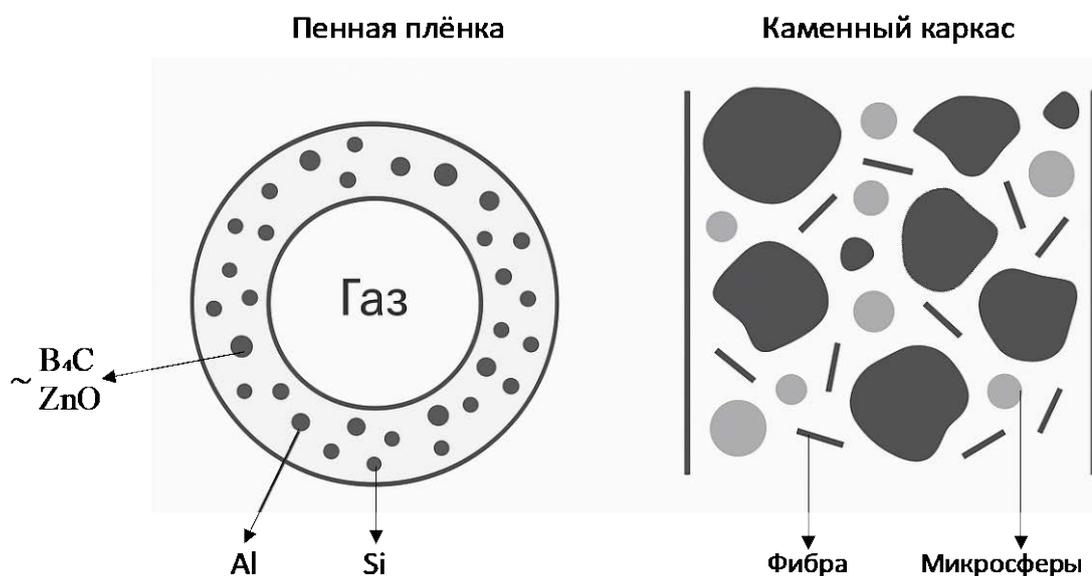


Рис. 1. Модификация состава пенобетона

В качестве базовой матрицы рассматривается смесь на основе портландцемента с различными добавками (наполнителями и заполнителями) с плотностью 600–900 кг/м³.

Объект исследования: жаростойкий пенобетон средней плотности.

Предмет исследования: радиационно-защитные, теплофизические и физико-химические свойства жаростойкого пенобетона.

Материалы и методы

Анализ литературы и подходов к созданию радиационно-защитных материалов

Для обеспечения комплексной радиационной и тепловой защиты разработка материалов должна опираться на междисциплинарный подход, объединяющий химию материалов, физику излучения и строительную инженерию. При этом важным становится не только подбор состава, но и управление структурой на нано- уровнях.

Одним из ключевых факторов, определяющих требования к радиационно-защитным материалам, является энергия и проникающая способность различных видов

ионизирующего излучения. Эти характеристики напрямую связаны с выбором химического состава материала. Для понимания принципов ослабления и поглощения ионизирующих излучений целесообразно рассмотреть физическую природу различных типов излучения и диапазон их энергий (Таблица 1) [5].

Таблица 1

Виды ионизирующего излучения

Класс	Вид излучения	Частицы / природа	Частота f / длина волны λ	Средняя энергия	Проникающая способность в бетоне
Электромагнитное	Радио	фотоны	$f = 3 \times 10^3 - 3 \times 10^9$ Гц; $\lambda \approx 10^2 - 10^5$ м	$10^{-9} - 10^{-3}$ эВ	мм-см
	Микроволны		$f = 3 \times 10^9 - 3 \times 10^{11}$ Гц; $\lambda \approx 1 - 0.001$ м	$10^{-3} - 10^{-1}$ эВ	мм-см
	Инфракрасное		$f = 3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14}$ Гц; $\lambda \approx 10^{-3} - 10^{-6}$ м	0.001-1 эВ	~мм (поверхностное поглощение)
	Видимый свет		$f = 4 \times 10^{14} - 7,5 \times 10^{14}$ Гц; $\lambda \approx 4 \times 10^{-7} - 7,5 \times 10^{-7}$ м	1.65-3.1 эВ	мм-см (почти не проникает в бетон)
	УФ		$f = 7,5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$ Гц; $\lambda \approx 1 - 4 \times 10^{-8}$ м	3-124 эВ	мм (поверхностное поглощение)
	Рентген		$f = 3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$ Гц; $\lambda \approx 10^{-10} - 10^{-12}$ м	0.1-1 МэВ	~см
	Гамма		$f > 3 \times 10^{19}$ Гц; $\lambda < 10^{-12}$ м	0.1-10 МэВ	~см-десятки см
Корпускулярное	Альфа	${}^2\text{He}^{2+}$ (2p + 2n)	-	4-8 МэВ	микрометры
	Бета	e^- / e^+		0.1-3 МэВ	мм-см
	Нейтроны	n^0		0.025 эВ (тепловые) – 10 МэВ (быстрые)	десятки см – метры

На основе анализа таблицы видно, что эффективная защита достигается сочетанием высокого атомного номера элементов для гамма-излучения и водород-/борсодержащих фаз для нейтронного поглощения.

Современные подходы к модификации материалов для защиты от излучения

Исследования показывают, что радиационная защита материалов определяется не только химическим составом, но и наноструктурой.

Исследование [6] посвящено созданию пенобетонного композита с улучшенными характеристиками поглощения электромагнитных волн. В качестве матрицы использован пенобетон, в который введены наполнители: феррит и углеродное волокно. Авторы отмечают, что добавление феррита ухудшает механические свойства материала, однако

приводит к более однородному распределению пор и, как следствие, к улучшению поглощающей способности. Добавление всего 0,3 мас.% углеродного волокна повышало прочность на сжатие и изгиб соответственно на около 10,9 % и 24,5 %. В частотном диапазоне 2-18 ГГц минимальный коэффициент отражения достиг $-27,2$ дБ при толщине образца 8,7 мм и резонансной частоте 15,84 ГГц; эффективная полоса поглощения составила 1,44 ГГц. Авторы делают вывод о синергетическом эффекте феррита и углеродного волокна.

В статье [7] предложена модификация пенобетона при помощи графита и углеродного волокна. В качестве цементной основы был использован сульфоалюминатный цемент 42.5, водоцементное отношение 0,5, плотность около 600 кг/м^3 . Волокно длиной 3 мм и диаметром 7 мм вводилось в количестве 0,6 мас.%, графит размером ~ 23 мкм до ~ 2 мас.%. Изучены гидратация, микроструктура, пористость и электромагнитные параметры. Добавление углеродного волокна повышало долю пор размером менее 200 мкм и усиливало изгибную прочность стенового материала; графит же нивелировал замедление гидратации, вызванное волокном, но увеличение содержания графита выше ~ 2 мас.% не оказывало значительного влияния на проводимость. Наибольшая эффективность поглощения отмечена при толщине 6 мм, когда эффективно поглощалась полоса около 2,5 ГГц (потери на отражение < -10 дБ). При толщине 8 мм и 10 мм диапазон снижался до $\sim 1,4$ ГГц и $\sim 0,9$ ГГц соответственно. Авторы делают вывод, что комбинированное введение графита и углеродного волокна значительно повышает электромагнитное поглощение пенобетона при малой толщине.

Обе статьи демонстрируют, что пенобетон можно эффективно модифицировать для задачи поглощения электромагнитных волн, так как введение функциональных наполнителей приводит к значительному снижению характеристики поглощения электромагнитных волн (дБ), расширению эффективной полосы поглощения (ГГц). Они дают основу для разработки пенобетонов с встроенными тяжёлыми фазами.

Авторы [8] исследовали пуолиуретан-пену, как лёгкий материал для защиты от ионизирующего излучения. В матрицу полимера введены наполнители: NiO, ZnO, Cr₂O₃, MnO₂, BaO(Fe₂O₃)₆ и шлам — общий объём загрузки до ≈ 44.5 мас.%. С помощью симуляций и программного обеспечения оценивалось ослабление γ -лучей (0.015–15 МэВ) и быстрых нейтронов (до ~ 11 МэВ) в этих композитах. Было показано, что введение наполнителей с высоким атомным номером значительно повышает линейный коэффициент ослабления для γ -лучей на низких энергиях. При этом чистая пена обеспечивает хорошую модерацию быстрых нейтронов благодаря наличию лёгких элементов (водород, углерод) в материале. Авторы делают вывод, что материал с наполнителями представляет собой перспективный лёгкий экраный материал для γ - и нейтронной защиты, особенно в приложениях с ограничением массы, конструкций малого веса и формируемых панелей.

Сопоставимые по природе оксидные фазы ранее вводились в цементную матрицу для ускорения твердения при пониженных и отрицательных температурах, где они продемонстрировали не только химико-технологическую совместимость с цементом, но и статистически значимый прирост прочности по сравнению с контрольным (бездобавочным) составом, что подтверждает возможность их применения в качестве функциональных радиационно-защитных и одновременно упрочняющих компонентов в пенобетонной структуре [9].

В работе [10] рассматривались композиционные металлические пены с разными размерами пустот и высоко Z-элементами (вольфрам, ванадий). По сравнению с чистым свинцом эффективность была чуть ниже, но с преимуществами по весу и переработке. Материалы показали хорошие характеристики по γ -лучам и нейтронам, ведь добавление высоко Z-элементов улучшало защиту, сохраняя низкую плотность и хорошие механические свойства.

На основании этих публикаций можно сделать вывод о том, что использование пенистых или пористых конструкций доказательно перспективно для радиационной защиты. Полимерная пеноматрица с высокой загрузкой тяжёлыми наполнителями показывает улучшение γ -защиты; металлические пены с высоко Z-элементами

демонстрируют улучшения в ослаблении рентгеновского, γ - и нейтронного излучения при существенно меньшей массе.

Таким образом, современные исследования направлены на поиск компромисса между плотностью и защитной эффективностью. Сводка ключевых подходов приведена в Таблице 2.

Таблица 2

Современные методы повышения радиационной стойкости бетонов

<i>Метод / технология</i>	<i>Механизм и физико-химическая сущность</i>	<i>Ключевые технические параметры</i>	<i>Основной эффект для радиационной защиты</i>	<i>Дополнительные эффекты</i>
Добавление тяжёлых оксидов (Bi_2O_3 , PbO , WO_3)	Увеличение коэффициента ослабления γ -квантов за счёт фотоэффекта и комптоновского рассеяния. Повышение эффективного атомного номера материала.	- Размер частиц <100 нм; - Содержание 3–10 % по массе; - Введение в цементную матрицу или пенную плёнку.	Увеличение ослабления γ -излучения на 30–50 % Снижение необходимой толщины материала	Незначительное увеличение плотности
Борсодержащие добавки (B_4C , BN , PVA-B)	Поглощение тепловых нейтронов за счёт большого сечения захвата. Совместное использование с водородсодержащим и фазами обеспечивает замедление и поглощение.	- Содержание 2–5 %; - Размер частиц: 0,5–20 мкм; - Введение в матрицу или пенную плёнку.	Повышение эффективности захвата нейтронов в 1,5–2 раза	Незначительное снижение прочности
Золь-гель модификация пенной плёнки (SiO_2 , Al_2O_3)	Формирование неорганической сетки (Si-O-Si , Al-O-Si), уплотнение и стабилизация плёнки, снижение диффузии воздуха.	- Концентрация прекурсора: 3–7 % - Формирование геля в процессе вспенивания	Повышение плотности пенной плёнки Рост устойчивости к γ -излучению Снижение воздушной пористости	Повышение прочности и термостойкости

Физико-химические механизмы радиационной стойкости

Для обоснования выбора компонентов и структуры разработанного материала рассмотрены основные физические процессы взаимодействия γ -квантов и нейтронов. Основные физические механизмы ослабления ионизирующего излучения [11] включают:

- Фотоэффект – полное поглощение γ -кванта и выбивание электрона с внутреннего энергетического уровня (эффективен при низких энергиях <0,1 МэВ).
- Комптоновское рассеяние – взаимодействие γ -кванта с слабо связанным электроном и потеря части энергии (0,1–2 МэВ).
- Образование электронно-позитронных пар — преобразование высокоэнергетического γ -кванта (>1,02 МэВ) в пару частиц.
- Упругое рассеяние нейтронов — передача кинетической энергии лёгким ядрам (эффективно при близкой массе нейтрона и ядра водорода).
- Поглощение тепловых нейтронов — захват замедленного нейтрона ядром с последующей ядерной реакцией (эффективно для бора, кадмия, лития).

Энергия тепловых волн и нейтронного излучения сопоставима по масштабу ($\sim 0,01$ – $0,1$ эВ), что открывает возможность их совместного подавления [12, 13]. Предполагается следующая модель замедления:

1. Быстрые нейтроны (1–20 МэВ) многократно рассеиваются на водородсодержащих полимерах.
2. При переходе в тепловой диапазон ($\sim 0,025$ эВ) они захватываются В4С и Li.
3. Остаточная энергия поглощается структурой материала через тепловые колебания, обеспечивая дополнительную защиту.

На основании рассмотренных физических механизмов возникает вопрос о том, как именно такие воздействия отражаются на ключевых связующих фазах цементного камня — гидросиликатах кальция, формирующих прочностной каркас структуры бетона. В последние годы опубликован ряд экспериментальных работ [14, 15], посвящённых γ -облучению образцов С–S–Н с различной степенью основности, в которых исследовались структурные, химические и механические изменения под действием ионизирующего излучения.

Экспериментальные данные по γ -облучению гидросиликатов кальция с разным отношением Ca/Si (то есть от низкоосновных с $C/S \approx 0,75$, у которых силикатные цепи длинные и хорошо сшитые, до более высокоосновных с $C/S \approx 1,33$ и выше, у которых цепи короче и межслойное пространство более кальций-насыщено) показывают, что в диапазоне доз до $\approx 0,8$ МГр не наблюдается критически опасных химико-структурных изменений ни в одном из типов С–S–Н. Не происходит дегидратации межслоя, не меняется общее содержание связанной воды, не изменяется локальное отношение Ca/Si, не нарушается морфология нанопластинчатых агрегатов, не укорачиваются силикатные цепи на уровне тетраэдров SiO₄.

Это означает, что и низкоосновные, и более высокоосновные гидросиликаты кальция химически и наноструктурно устойчивы к облучению γ -квантами в этом диапазоне доз.

Однако долговечность биологической защиты реактора критична не только в первые десятилетия, но и на горизонте 60 – 80 лет эксплуатации [16], то есть при суммарных дозах γ -излучения порядка десятков и сотен МГр в прикорпусной зоне. На таких дозах режим поведения С–S–Н меняется принципиально. Показано, что при облучении до десятков–сотен МГр происходит радиационно-индуцированная дегидратация межслоя, когда базальное расстояние между слоями С–S–Н уменьшается примерно на несколько десятых, фиксируется потеря межслоевой воды и рост доли фиксированных гидроксильных групп за счёт перестройки ближнего окружения кальция и кремния. Это сопровождается увеличением модуля Юнга и одновременным снижением ползучести, измеренной методами наноиндентации и длительного удержания нагрузки. Иными словами, при высоких дозах γ -облучения С–S–Н становится более жёстким, менее вязкоупругим и хуже способен расслаблять напряжения.

При этом расчётный срок службы демонстрационного реактора БРЕСТ-ОД-300 установлен около 30 лет¹, что согласуется с традиционной практикой вывода энергоблоков АЭС из эксплуатации. В этих условиях суммарная дозовая нагрузка на защитные цементные конструкции не достигает диапазона, при котором наблюдается критическая потеря вязкоупругих характеристик цементного камня. Это позволяет утверждать, что для рассматриваемого конструкционного срока службы сохранение работоспособности цементной компоненты пенобетона, в том числе её способности перераспределять и релаксировать напряжения, является обеспеченным.

Гидросиликаты кальция можно считать радиационно-стойкими по химической структуре, но подверженными радиационно-механическому упрочнению и потере релаксационной способности при дозах выше 10^7 – 10^8 Гр. Это важно учитывать при

¹ Фишман Р. Новое слово в энергетике: зачем России нужен атомный реактор с замыканием топливного цикла // TechInsider. 20.01.2022. URL: <https://www.techinsider.ru/technologies/800463-novoe-slovo-v-energetike-zachem-rossii-nuzhen-atomnyy-reaktor-s-zamykaniem-toplivnogo-cikla/>

проектировании цементных композитов для ядерной энергетики, ведь устойчивость C–S–H к разрушению не гарантирует сохранения их вязкоупругих свойств.

Результаты и обсуждение

Экспоненциальная модель ослабления γ -излучения

Для количественной оценки эффективности экранирования ионизирующего излучения материалами на цементной основе были рассмотрены классические инженерные экспоненциальные модели затухания:

- экспоненциальная модель для γ -излучения (характеризует, насколько сильно материал ослабляет поток γ -излучения на единицу толщины: чем больше μ , тем материал тяжелее в смысле радиационной защиты) (1);
- модель поглощения тепловых нейтронов (определяет, какая доля нейтронов поглощается в единичном слое толщины: чем больше Σ , тем эффективнее материал для нейтронной защиты) (2).

Рассмотрены тяжёлые радиационно-защитные бетоны, традиционно применяемые в ядерных установках [1, 17, 18]. Их моделирование позволяет оценить закономерности ослабления γ - и нейтронного излучения в зависимости от плотности, химического состава и толщины слоя, а также параметры, характеризующие способность материала к поглощению энергии ионизирующего излучения. Такой подход важен, поскольку тяжёлые бетоны служат моделью радиационной защиты. Однако при проектировании новых материалов необходимо понимать, насколько изменение структуры влияет на экранирующую способность.

Результаты моделирования приведены на Рис. 2.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

$$P = 1 - e^{-\Sigma x} \quad (2)$$

где μ — линейный коэффициент ослабления γ -излучения (1/см);
 Σ — макроскопический коэффициент поглощения нейтронов (1/см);
 I — интенсивность прошедшего γ -излучения;
 I_0 — начальная интенсивность;
 P — вероятность захвата нейтрона;
 x — толщина слоя материала (см).

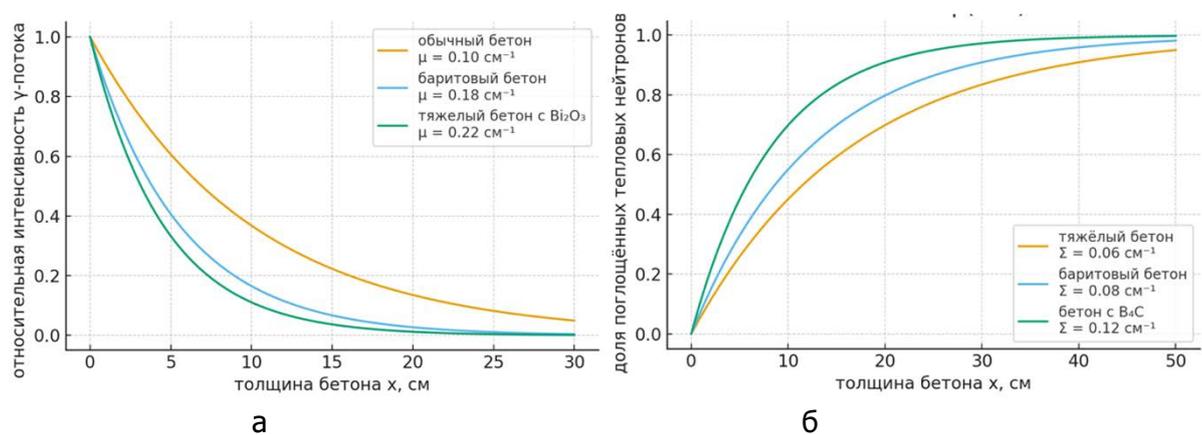


Рис. 2. Эффективность радиационной защиты тяжелого бетона:
 а — ослабление гамма-излучения, б — поглощение тепловых нейтронов

На графике (а) показано, как уменьшается относительная интенсивность γ -излучения с ростом толщины слоя бетона при разных значениях μ . На графике (б) показано, как растёт доля поглощённых нейтронов с увеличением толщины слоя при разных значениях Σ . Для бетона без бора требуется толщина порядка 40–50 см, чтобы поглотить ~90 % тепловых

нейтронов. Для бетона с добавками бора примерно та же степень защиты достигается уже при толщине порядка 20 см.

Таким образом, эффективный радиационно-защитный бетон для ядерной энергетики должен быть не просто тяжёлым, а композиционно функционализированным. Это напрямую согласуется с предложенной в работе концепцией многоуровневого материала, в котором минерализованный каркас насыщается тяжёлыми фазами; стабилизированная пенная плёнка дополняется борсодержащими и водородсодержащими компонентами. Именно такое сочетание позволяет одновременно уменьшить толщину защитного слоя и снизить массу конструкции, что критично для ограждающих и навесных элементов в ядерно-энергетических установках.

Для подтверждения возможности функционализации пенной структуры в аналогичных системах рассмотрен пример пенобетона, модифицированного углеродными материалами (Рис. 3).

Ранее мы рассмотрели, что одним из перспективных направлений пенобетонов является придание им способности поглощать электромагнитное излучение [7, 8, 19]. Введение графита и углеродных волокон не только повышает электропроводность пенной плёнки, но и расширяет диапазон эффективного поглощения.

Авторы проводили измерения отражательной способности материала) в диапазоне 2–18 ГГц для образцов различной толщины (6, 8 и 10 мм). Эффективной считается область, где уровень отражения $RL < -10$ дБ, что соответствует поглощению более 90 % падающей мощности электромагнитной волны. Ширина этих интервалов (0,8–2,5 ГГц) использована на графике для анализа зависимости эффективной полосы поглощения от толщины образца.

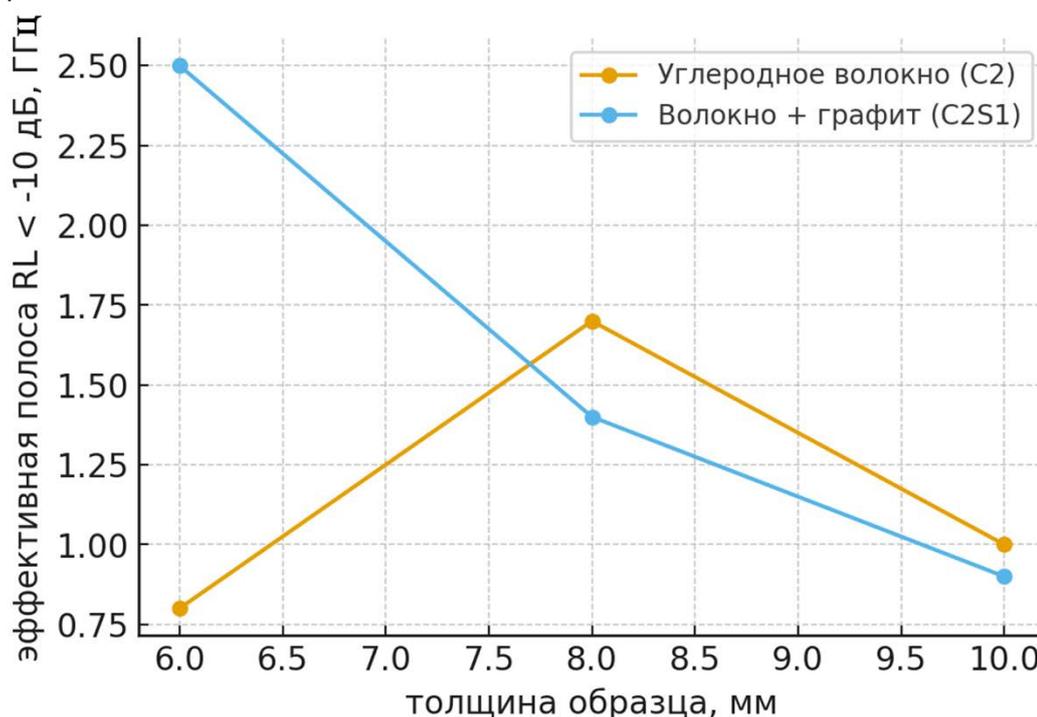


Рис.3. Эффективная полоса поглощения от толщины образца

Такое поведение подтверждает ключевую идею работы, когда пенная структура бетона может быть использована для управления взаимодействием с излучением, что делает возможным создание многослойных радиационно-защитных материалов нового поколения.

Заключение

Результаты моделирования показывают, что эффективная радиационная защита может быть достигнута не только за счёт увеличения плотности материала. Переход к

пенобетонам демонстрирует возможность альтернативного подхода — использования пористой структуры и добавок для управления взаимодействием материала с излучением. Проведённый анализ и моделирование показали, что:

- Эффективность γ -экранирования определяется линейным коэффициентом ослабления μ , зависящим от плотности и атомного состава материала.
- Защита от тепловых нейтронов обеспечивается фазами с высоким коэффициентом поглощения Σ . Добавление борсодержащих компонентов позволяет достичь эквивалентной эффективности при вдвое меньшей толщине слоя.
- Комбинированное увеличение μ и Σ в одном материале возможно при одновременной интеграции тяжёлых и борсодержащих фаз.

Анализ подтвердил, что изменение состава пенной плёнки существенно расширяет диапазон эффективного поглощения электромагнитного излучения, демонстрируя потенциал пенной структуры.

Таким образом, пенобетонная матрица может быть целенаправленно модифицирована для формирования комплексной защиты от γ - и нейтронного излучения без увеличения плотности и массы материала.

Список литературы

1. Ahmad, N. et al. Idris, M.I., Hussin, A. et al. Enhancing shielding efficiency of ordinary and barite concrete in radiation shielding utilizations / N. Ahmad, M. I. Idris, A. Hussin, J. A. Karim, N. M. Azreen, R. Zainon // Scientific Reports. 2024. V. 14. 26029. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76402-0>
2. Новиков Н. В., Самченко С. В., Окольникова Г. Э. Баритсодержащие радиационно-защитные строительные материалы // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2020. №1.
3. Карнаухов, А. А. Радиационно-устойчивый бетон на основе модифицированного гидроксида титана и высокоглиноземистого цемента // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2019. № 6. С. 68-73.
4. Казанская, Л. Ф., Майер В. А., Сибгатуллин Э. С. Взаимосвязь факторов, определяющих долговечность бетонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, № 4. С. 931-943. DOI 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943. EDN GXVSEW.
5. Сычева, А. М., Майер В. А., Арзамасцев А. А. Жаростойкий пенобетон с радиационно-защитной функцией // Распределенная энергетика сегодня. Материалы, технологии и устройства : Сборник тезисов докладов третьей молодежной научной конференции, Екатеринбург, 23 мая 2025 года. Екатеринбург, 2025. С. 39-41. EDN EDRQTF.
6. Bai, Y.-H., Zhang, D.-Y., & Lu, Y. Foamed concrete composites: Mn–Zn ferrite/carbon fiber synergy enhances electromagnetic wave absorption performance // Construction and Building Materials. 2023. V. 49, I. 21. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.08.058>
7. Tu, Q., Liu, J., Wang, J., Li, Y., & Zhang, H. Preparation of a novel foamed concrete modified with graphite and carbon fiber: Mechanical, electromagnetic and microstructural characteristics based on X-CT // Construction and Building Materials. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31665>.
8. Oraby, H., Hegazy, G. E., ElTalaawy, S. M., & Nabil, I. M. (2025). Polyurethane-based foam composites: synthesis, structural characteristics, and radiation shielding properties. // Scientific Reports. 15. 12227. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95497-7>
9. Сычева А. М. Добавки некоторых новых типов для твердения цементных смесей при пониженных и отрицательных температурах : дис. канд. техн. наук : 05.23.05. Санкт-Петербург, 2000. 203 с.
10. Chen S., Bourham M., Rabiei A. Attenuation efficiency of X-ray and comparison to gamma ray and neutrons in composite metal foams. // Radiation Physics & Chemistry. 2015. Vol. 117. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.07.003>

11. Васильева А. В., Рыжова В. А., Васильев А. С. Визуализация источников гаммаизлучения с использованием сцинтилляционного метода и кодирующей апертуры // Приборостроение. 2019. №1.
12. Васильев Г. А. Водородсодержащие материалы для атомной энергетики // МНИЖ. 2014. №11-2 (30).
13. Палеха В. А., Гетьман А. А. Бор. Свойства и применение в ядерной энергетике // Литьё и металлургия. 2017. №3 (88).
14. Tajuelo Rodriguez E., Hunnicutt W. A., Mondal P., Le Pape Y. Investigation of gamma-irradiated calcium silicate hydrates. Part I: Chemical and structural properties // Journal of the American Ceramic Society. 2019. Vol. 102, No. 11. P. 6511–6525. <https://doi.org/10.1111/jace.16515>
15. Baral A. et al. , Ultra-high gamma irradiation of calcium silicate hydrates: Impact on mechanical properties, nanostructure, and atomic environments / A. Baral, Rodriguez E. Tajuelo, W. A. Hunnicutt, E. Cakmak, H. Sun, J. Ilavsky, Y. Le Pape, T. M. Rosseel, N. Garg // Cement and Concrete Research. 2021. Vol. 147. P. 106508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106855>
16. Esselman, T. Expected condition of concrete exposed to radiation at age 80 years of reactor operation. May. 2018. <https://doi.org/10.2172/1468217>
17. Badarloo, B., Lehner, P., Bakhtiari Doost, R. Mechanical Properties and Gamma Radiation Transmission Rate of Heavyweight Concrete Containing Barite Aggregates // Materials. – 2022. T. 15, № 6. 2173. <https://doi.org/10.3390/ma15062173>
18. Singh, V., Kumar, P., Patel, R., Tariq, M. Radiation-shielding concrete: A review of materials, performance, and challenges // Case Studies in Construction Materials. 2024. T. 21. e02684. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110800>
19. Bian, P. et al. Investigation on the electromagnetic wave absorption properties of foamed concrete / P. Bian, B. Zhan, P. Gao, Q. Yu, Y. Yang, L. Hong, W. Zhang // SSRN Electronic Journal. 2022. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4206638>

References

1. Ahmad, N. et al. Idris, M.I., Hussin, A. et al. Enhancing shielding efficiency of ordinary and barite concrete in radiation shielding utilizations / N. Ahmad, M. I. Idris, A. Hussin, J. A. Karim, N. M. Azreen, R. Zainon // Scientific Reports. 2024. V. 14. 26029. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76402-0>
2. Novikov, N. V., Samchenko, S. V., Okolnikova, G. E. Barite-containing radiation-shielding building materials // RUDN Journal of Engineering Researches. 2020. No. 1.
3. Karnaukhov, A. A. Radiation-resistant concrete based on modified titanium hydride and high-alumina cement // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. — 2019. — No. 6. — Pp. 68–73.
4. Kazanskaya, L. F. Interrelation of factors determining durability of concrete / L. F. Kazanskaya, V. A. Maier, E. S. Sibgatullin // Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering. - 2024. - Vol. 21, No. 4. - P. 931-943. - DOI 10.20295/1815-588X-2024-04-931-943. - EDN GXVSEW.
5. Sycheva, A. M., Maier, V. A., Arzamastsev, A. A. Heat-resistant foam concrete with radiation-shielding function // Distributed Energy Today: Materials, Technologies and Devices. Proceedings of the 3rd Youth Scientific Conference, Yekaterinburg, May 23, 2025. Yekaterinburg, 2025. Pp. 39-41. EDN: EDRQTF.
6. Bai, Y.-H., Zhang, D.-Y., & Lu, Y. Foamed concrete composites: Mn–Zn ferrite/carbon fiber synergy enhances electromagnetic wave absorption performance // Construction and Building Materials. 2023. V. 49, I. 21. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.08.058>
7. Tu, Q., Liu, J., Wang, J., Li, Y., & Zhang, H. Preparation of a novel foamed concrete modified with graphite and carbon fiber: Mechanical, electromagnetic and microstructural characteristics based on X-CT // Construction and Building Materials. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31665>.

8. Oraby, H., Hegazy, G. E., ElTalawy, S. M., & Nabil, I. M. (2025). Polyurethane-based foam composites: synthesis, structural characteristics, and radiation shielding properties. // *Scientific Reports*. 15. 12227. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95497-7>
9. Sychyova A. M. Additives of Certain New Types for the Hardening of Cement Mixtures at Low and Subzero Temperatures: Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences (05.23.05). Saint Petersburg, 2000. 203 p.
10. Chen S., Bourham M., Rabiei A. Attenuation efficiency of X-ray and comparison to gamma ray and neutrons in composite metal foams. // *Radiation Physics & Chemistry*. 2015. Vol. 117. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.07.003>Vasilieva, A. V., Ryzhova, V. A., Vasiliev, A. S. Visualization of gamma-radiation sources using scintillation method and coded aperture // *Instrumentation*. 2019. No. 1.
11. Vasiliev, G. A. Hydrogen-containing materials for nuclear power engineering // *International Research Journal*. — 2014. — No. 11-2 (30).
12. Palekha, V. A., Getman, A. A. Boron: properties and applications in nuclear energy // *Foundry and Metallurgy*. — 2017. — No. 3 (88).
13. Tajuelo Rodriguez, E., Hunnicutt, W. A., Mondal, P., Le Pape, Y. Investigation of gamma-irradiated calcium silicate hydrates. Part I: Chemical and structural properties // *Journal of the American Ceramic Society*. 2019. Vol. 102, No. 11. Pp. 6511–6525. DOI: <https://doi.org/10.1111/jace.16515>
14. Tajuelo Rodriguez E., Hunnicutt W. A., Mondal P., Le Pape Y. Investigation of gamma-irradiated calcium silicate hydrates. Part I: Chemical and structural properties // *Journal of the American Ceramic Society*. 2019. Vol. 102, No. 11. P. 6511–6525. <https://doi.org/10.1111/jace.16515>
15. Baral A. et al. , Ultra-high gamma irradiation of calcium silicate hydrates: Impact on mechanical properties, nanostructure, and atomic environments / A. Baral, Rodriguez E. Tajuelo, W. A. Hunnicutt, E. Cakmak, H. Sun, J. Ilavsky, Y. Le Pape, T. M. Rosseel, N. Garg // *Cement and Concrete Research*. 2021. Vol. 147. P. 106508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106855>
16. Esselman, T. Expected condition of concrete exposed to radiation at age 80 years of reactor operation. May. 2018. <https://doi.org/10.2172/1468217>
17. Badarloo, B., Lehner, P., Bakhtiari Doost, R. Mechanical Properties and Gamma Radiation Transmission Rate of Heavyweight Concrete Containing Barite Aggregates // *Materials*. – 2022. T. 15, № 6. 2173. <https://doi.org/10.3390/ma15062173>
18. Singh, V., Kumar, P., Patel, R., Tariq, M. Radiation-shielding concrete: A review of materials, performance, and challenges // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. T. 21. e02684. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110800>
19. Bian, P. et al. Investigation on the electromagnetic wave absorption properties of foamed concrete / P. Bian, B. Zhan, P. Gao, Q. Yu, Y. Yang, L. Hong, W. Zhang // *SSRN Electronic Journal*. 2022. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4206638>