

На правах рукописи

Тарасов Игорь Владимирович

**ЦЕМЕНТНЫЕ БЕТОНЫ И РАСТВОРЫ
С ПОНИЖЕННОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТЬЮ
И РАДОНОПРОНИЦАЕМОСТЬЮ**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Красноярск – 2008

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рашит Анварович Назиров

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Николай Алексеевич Машкин

кандидат геолого-минералогических наук,
Виталий Владимирович Коваленко

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Томский государственный
архитектурно-строительный университет»

Защита состоится 18 ноября 2008 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.08 при федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 82, ауд. К-120. Тел. (8-391) 252-78-66; факс (8-391) 252-78-66; e-mail tarasovs_box@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института градостроительства, управления и региональной экономики Сибирского федерального университета

Автореферат разослан « 16 » октября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Е.В. Пересыпкин

Общая характеристика работы

Актуальность: Актуальность исследований обусловлена необходимостью научной проработки вопроса об основах и методах получения экологически чистых по радиационному фактору строительных материалов, в том числе с пониженной радонопроницаемостью.

Всесторонняя распространенность естественных радионуклидов (ЕРН) и продуктов их распада в минеральных и органических веществах, вовлекаемых в строительное производство, ставит ряд экологических и социально-экономических проблем в жилищном комплексе. Прежде всего, это связано с тем, что эманации радиоактивных газов радона и торона, выделяемые в результате распада ЕРН, способствуют существенному повышению объемных активностей (ОА) этих газов внутри помещений. Кроме того, внутри здания изменяется геометрия изотропного поля излучения, вследствие чего при одинаковой концентрации радиоактивных элементов доза облучения в помещении будет всегда больше, чем на открытой местности. Принимая во внимание то, что более половины своего времени человек проводит в помещениях зданий, очевидно, что ведущая роль в решении задачи снижения облучения населения принадлежит строительной отрасли, а разработка составов экологически чистых по радиационному фактору строительных материалов и способов снижения их радонопроницаемости является современной актуальной задачей.

Уменьшение уровня облучения населения от естественных источников ионизирующего излучения без значительных капитальных затрат возможно за счет снижения естественной радиоактивности строительных материалов путем выбора сырья с меньшим содержанием ЕРН и радоновыделением.

Цель работы: разработка составов цементных бетонов и растворов, обеспечивающих снижение доз облучения населения от естественных радионуклидов в помещениях зданий.

Основные задачи исследований:

- Разработать методику определения эффективного коэффициента диффузии радона в материале ускоренным методом с применением высокоэманирующей породы в качестве источника радона.
- Исследовать возможность снижения радонопроницаемости цементных бетонов и растворов путем инициирования кристаллизации новообразований в поровом пространстве поверхностного слоя цементных композиций.
- Исследовать влияние попеременного замораживания и оттаивания на выход радона из цементных бетонов.
- На основе результатов изучения эманирования компонентов разработать составы цементных бетонов с пониженным радоновыделением и произвести их оценку по снижению индивидуальной эффективной дозы внутреннего и внешнего облучения в помещениях зданий.

Научная новизна:

- Установлено, что эмпирическое распределение значений плотности потока радона (ППР) на участках, отводимых под застройку на территории г. Красноярска, приближается к логнормальному закону. Среднее значение ППР составило $54,4 \text{ мБк/с}\cdot\text{м}^2$. Верхняя граница доверительного интервала равна $100 \text{ мБк/с}\cdot\text{м}^2$.

- Установлено, что образование высокосульфатной формы гидросульфоалюмината кальция в поровом пространстве поверхностного слоя в среднем в 3,2 раза снижает радонопроницаемость цементных композиций.
- Выявлена аналитическая зависимость влияния влажности окружающей среды на эманирование природного источника радона. При увеличении относительной влажности воздуха с 35% до 60% (в интервале эксплуатационной влажности помещений жилых квартир) коэффициент эманирования по радону увеличивается на 55%.
- Установлено, что при испытаниях тяжелого бетона на морозостойкость количество выделяемого радона на начальных стадиях увеличивается, а затем практически не изменяется. Это увеличение обусловлено механизмом морозного разрушения структуры бетона, который создает благоприятные условия для диффузии радона от крупного заполнителя наружу.
- Отмечено, что радоновыделение образцов газобетона автоклавного твердения уменьшается с увеличением количества циклов замораживания и оттаивания. Это обусловлено, по всей видимости, преобладанием процесса карбонизации гидросиликатов кальция при испытаниях.

Практическая ценность:

- Развито направление улучшения радиационно-экологических показателей цементных бетонов и растворов за счет снижения их эманирования путем использования низкоэманирующих заполнителей, например, радиационно-чистых пород горнблендита, сидерита, являющихся побочными продуктами горной промышленности, мраморных пород, а также тонкомолотого доломита в качестве минеральной добавки.
- Разработаны составы низкоэманирующих тяжелых бетонов, не уступающих по своим строительно-техническим свойствам традиционным, применение которых обеспечивает снижение суммарной дозы облучения населения в помещениях зданий до 42%.
- Применение гипсосодержащих материалов, например, кеков – отходов цветной металлургии в конструктивных схемах монолитных бетонных стяжек, обеспечивающее снижение уровня облучения населения в помещениях зданий.
- Методика нестационарного определения коэффициента диффузии радона строительных материалов, позволяющая в десять и более раз сократить время эксперимента.

Реализация результатов работы

На основе результатов диссертационных исследований разработаны составы растворов с пониженной радонопроницаемостью для производства противорадиационных барьеров по грунтовому основанию. Предлагаемые составы приняты к практическому применению в зданиях серии 111-97.00 при строительстве на радоноопасных территориях. Основные результаты работы внедрены в учебные курсы «Методы исследования и контроля качества строительных материалов» и «Использование отходов промышленности в производстве строительных материалов» для специальности 270106 «Производство строительных материалов, изделий и конструкций». Результаты исследований и научных разработок при-

меняются в производственной деятельности отделения радиометрии радона ФГУ здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Красноярском крае».

Методология работы

Методология работы основана на базовых положениях строительного материаловедения, физико-химических превращениях при гидратации цемента, формировании структуры материалов, а также на показателях естественной радиоактивности компонентов сложных строительных смесей. Проведение исследований осуществлялось с использованием современных теоретических и технических разработок, известных в области технологии строительных материалов, учёных Ю.М. Баженова, Ю.М. Бутта, А.В. Волженского, И.Н. Ахвердова, И.И. Курбатовой, В.Г. Батракова и исследований в области естественной радиоактивности И.Е. Старика, Э.М. Крисяка, В.В. Коваленко, Р.А. Назирова, Л.А. Гулабянца и др.

Апробация работы и публикации

Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на конференциях, в том числе: XXIV Региональной научно-технической конференции «Проблемы строительства и архитектуры» (Красноярск, 2006 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (Красноярск, 2006 г.); Красноярском городском социальном форуме (Красноярск, 2006 г.), XIII Международном семинаре Азиатско-Тихоокеанской академии материалов «Строительные и отделочные материалы. Стандарты XXI века» (г. Новосибирск, 2006); Всероссийской научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях» (г. Москва, 2007 г.).

По материалам диссертации опубликовано 24 работы включая 2 статьи в изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК РФ и получен патент на изобретение.

Основные положения, выносимые на защиту:

- статистические показатели распределения значений мощности дозы гамма-излучения и эквивалентной равновесной объемной активности радона в помещениях зданий городов Красноярского края и плотности потока радона на территории г. Красноярска;
- аналитическая зависимость эманирования источника радона от относительной влажности воздуха;
- методика ускоренного способа определения эффективного коэффициента диффузии радона в материале и результаты расчета по предлагаемому методу;
- способ снижения радонопроницаемости цементных монолитных радонозащитных барьеров;
- составы бетонов с пониженной эманирующей способностью;
- экспериментальные зависимости радоновыделения тяжелого и ячеистого автоклавного бетона от количества циклов попеременного замораживания и оттаивания и их научно-теоретическое обоснование.

Вклад автора в решение научной задачи

Автором осуществлено проведение экспериментов, обобщение результатов расчётов и экспериментальных исследований; внедрение результатов работы в строительную практику. Впервые установлен закон распределения значений плотно-

сти потока радона на участках, отводимых под застройку на территории г. Красноярска, и научно обоснована верхняя граница доверительного интервала этой величины. В интегрированной системе программирования MathCad разработан алгоритм расчета коэффициента диффузии радона в материале и эффективности применения низкоэманирующих бетонов в снижении эффективной дозы облучения населения от естественных радионуклидов в помещениях зданий из сборного железобетона.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и основных выводов, изложена на 208 страницах машинописного текста, содержит 70 рисунков, 45 таблиц, список используемой литературы из 185 наименований и 7 приложений на 27 страницах.

Диссертационная работа выполнялась в Сибирском федеральном университете. Эксперименты и лабораторные исследования проводились в лаборатории строительной физики и радиационного контроля Сибирского федерального университета и испытательном лабораторном центре Федерального государственного учреждения здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Красноярском крае».

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационных исследований, сформулированы цель и задачи работы, показана её научная новизна и практическая ценность, изложены основные положения, вынесенные на защиту, а также приведены сведения об апробации работы.

Глава 1 посвящена вопросам воздействия природных источников ионизирующего излучения (ИИИ) на здоровье населения, естественной радиоактивности строительных материалов и их влияния на формирование радиационного фона в помещениях зданий. Рассмотрены основные способы защиты населения от природных и техногенных ИИИ в жилых помещениях в мировой практике.

Основную часть облучения население Земли получает от природных ИИИ. Они формируют естественный радиационный фон (ЕРФ) биосферы, состоящий из космического излучения и излучения естественно распределенных природных радиоактивных веществ (в приземной атмосфере, на поверхности земли, в строительных материалах, в продуктах питания, воде и др.). На протяжении последних десятилетий наблюдается постепенное увеличение ЕРФ за счет современной производственной деятельности человека, в результате которой формируется технологически измененный естественный радиационный фон (ТИЕРФ). Его величина обусловлена дополнительным поступлением естественных радионуклидов в среду обитания человека вместе с разнообразными видами минерального сырья, извлекаемого из недр.

Согласно последним результатам отечественных исследований наибольший вклад (79,2 %) в годовую эффективную дозу облучения населения России, составившую в 2006 году 3,74 мЗв, вносит облучение от природных ИИИ. Значительным является и облучение за счет применения лучевых методов диагностики в медицине (20,5 %). Вклад в годовую дозу облучения населения страны за счет эксплуатации ядерно-технических установок, глобальных выпадений и техногенного фона составляет всего 0,32 %. Следует отметить, что население нашей страны получает дозу облучения от ЕРН, более чем в 3 раза превышающую величину предела дозы,

нормируемой СП 2.6.1.758-99 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99)» от техногенного излучения, равную 1 мЗв в год.

Установлено, что более половины средней годовой эффективной дозы облучения жители России получают от вдыхания радона и его дочерних продуктов распада (ДПР), которые в тех или иных количествах неизбежно присутствуют в воздухе любого здания. По оценкам НКДАР ООН, радон со своими ДПР ответственен приблизительно за 3/4 годовой дозы облучения, получаемой населением от земных источников радиации.

Радон и его ДПР за счет ионизирующего излучения вызывают внешнее и внутреннее облучение человека. В результате воздействия ионизирующего излучения на организм человека в тканях могут происходить вредные для здоровья физические, химические и биохимические процессы.

В России жилищный фонд представлен преимущественно многоэтажными зданиями из кирпича и железобетона. Некоторые отечественные публикации и работы, посвященные измерениям радона в воздухе помещений, указывают на существенный вклад этих строительных материалов в формирование уровня концентрации радона, однако чаще всего основным источником поступления радона в здание является его грунтовое основание.

Имеющийся в строительной практике положительный опыт реализации мероприятий, направленных на снижение облучения населения, опровергает мнение о невозможности влияния на уровень облучения, обусловленного природными ИИИ. Однако в эксплуатируемых зданиях эти мероприятия, как правило, экономически не целесообразны, поэтому их реализация должна иметь превентивный характер.

Во второй главе представлены характеристики средств измерений, описание методик проведения инструментальных измерений и методов испытаний, а также приведены характеристики используемых материалов.

В качестве основного средства измерений в данной работе использовалась портативная компактная измерительная система, предназначенная для мгновенных измерений и продолжительного мониторинга ОА радона-222 и его ДПР, мощности дозы гамма-излучения, а также ряда климатических параметров, центральным блоком которой является радон-монитор «AlphaGUARD PQ2000».

Величину параметров эманирования определяли на основании анализа кривой накопления радона в герметичном контейнере известного объема из образца материала с известным содержанием радия-226. Алгоритм расчета реализован в интегральной системе программирования MathCAD.

В работе применялся красноярский портландцемент 400-Д20, по химическому составу и физико-механическим свойствам соответствующий требованиям ГОСТ 10178-85.

Для изготовления экспериментальных составов рядовых и низкоэманирующих бетонов применялся обычный кварцевый щебень и песок, а также мраморные, горнблендитовые и сидеритовые заполнители. По результатам проведенных исследований установлена перспективность применения этих материалов, являющихся побочными продуктами горной промышленности в качестве заполнителей для экологически чистых по радиационному фактору тяжелых бетонов. Содержание радия в этих породах в 4...7 раз меньше, чем в цементе и обычных заполнителях, они обладают стойкостью к силикатному и железистому распаду, высокой плотностью и низким водопоглощением. Свойства заполнителей представлены в табл. 1–3.

Таблица 1

Химический состав горнблендита и сидерита

Материал	Содержание оксидов, масс. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃	TiO ₂	п.п.п.
Горнблендит	39,2	17,37	17,51	8,87	10,94	–	–	3,45
Сидерит	28,06	2,86	43,13	2,25	1,13	0,87	0,16	18,70

Таблица 2

Свойства кварцевого, горнблендитового и сидеритового щебня

Вид щебня	Средняя плотность зерен, кг/м ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Стойкость к распаду		Водопоглощение W, %	Марка по прочности
			силикатному	железистому		
Щебень из гравия	2500	1450	Стоек	Стоек	0,8	1400
Горнблендитовый щебень	3026	1900	Стоек	Стоек	0,56	1400
Сидеритовый щебень	3330	1700	Стоек	Стоек	0,2	1200

Таблица 3

Свойства используемых материалов по содержанию естественных радионуклидов и эманулирующей способности по радону

Материал	Удельная активность, Бк/кг			Удельная эффективная активность, Бк/кг	Эманулирующая способность по радону, Бк/кг
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K		
Портландцемент 400-Д20	47,9	18,3	247	93,9	6,23
Кварцевые заполнители	29,4	24,7	452	102,2	4,70
Горнблендитовые заполнители	6,0	-	-	6,0	1,17
Сидеритовые заполнители	13,0	3,0	130	29,0	1,53
Карбонатные заполнители (мрамор)	8,2	-	16,1	9,7	1,21
Наполнитель доломитовый	6,6	-	-	6,6	0,86

В работе также применялся гипсосодержащий отход промышленности – кек, образующийся в результате производственной деятельности завода цветных металлов. Маточные растворы, содержащие в основном ионы железа, натрия, аммония, хлора и сульфат-ион, нейтрализуют известковым молоком. Отходы нейтрализации этих растворов называются гипсосодержащими кеками. Они представляют собой тестообразную массу, состоящую в основном из тонкодисперсного двухводного гипса, известкового теста, аморфных соединений железа и воды. В табл.4 представлен химический состав кека.

Таблица 4

Химический состав кека

Наименование пробы	Содержание оксидов, масс. %							п.п.п
	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	FeO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	
Кек	23,2	30,36	16,24	-	6,2	0,46	0,18	21,9

Методом рентгенофазового (рис.1) и дифференциально-термического (рис.2) анализов установлено, что минералогический состав кека представлен в основном гипсом, гидратированной известью и вторичным карбонатом кальция.

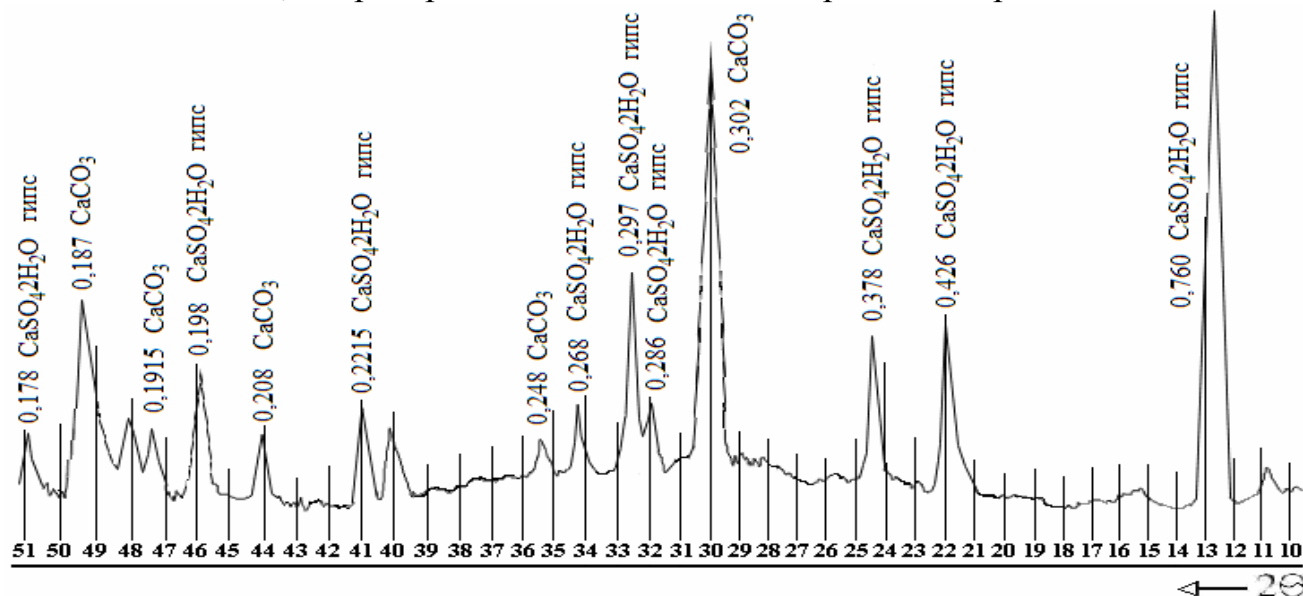


Рис.1. Рентгеновская дифрактограмма кека

Расчёты, проведённые по данным химического и дифференциально-термического анализа, показали, что содержание гипса в кеке находится в пределах 22...27 %, а карбоната кальция – 25...38 %.

Глава 3 посвящена изучению и анализу радиационной обстановки в Красноярском крае и существующих методов определения коэффициента диффузии (КД) радона в пористой среде, разработке лабораторного метода определения коэффициента диффузии с использованием высокоэманулирующего источника радона и способов снижения радонопроницаемости цементных композиций.

В результате статистической обработки данных, включающих около 3000 измерений плотности потока радона, выполненных на территории г. Красноярска, установлено, что эмпирическое распределение значений приближается к логнормальному закону. Установлено, что среднее значение ППР на территории г. Красноярска в исследуемый период составило 54,4 мБк/с·м², что более, чем в 2 раза выше аналогичного показателя в г. Москве (25 мБк/с·м²). Верхняя граница доверительного интервала равна 100 мБк/с·м², что на 25 % превышает установленное предельно допустимое значение. Этот норматив превышают свыше 350 значений, что составляет почти 12 % всей выборки.

Отсюда следует, что территория Красноярского края характеризуется повышенной радоноопасностью. В связи с этим, разработка способов и материалов, способных эффективно препятствовать поступлению радона в воздух жилых помещений зданий, представляется актуальной задачей для нашего региона.

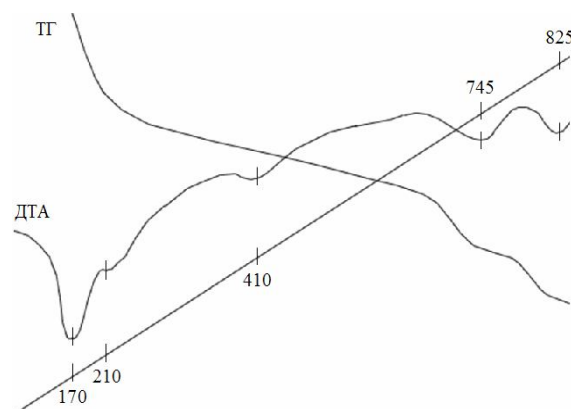


Рис.2. Дериватограмма кека

Методы исследований по определению коэффициента диффузии материалов с использованием высокоэманулирующих пород с большим содержанием урана в качестве источника радона требуют подробного изучения их поведения в зависимости от характеристик среды.

С целью оценки влияния влажности на процесс эманирования радона нами проведены специальные исследования. Высокоэманулирующий источник радона помещали в эманационный контейнер емкостью 200 литров при разной относительной влажности воздуха и наблюдали за накоплением радона (рис.3).

По результатам эксперимента установлено, что влажность окружающей среды в значительной степени влияет на интенсивность выхода радона. При увеличении влажности воздуха с 34,8 % до 57,9 % (на 66 %) равновесная концентрация радона в герметичном контейнере возросла с 2310 Бк/м³ до 3580 Бк/м³ (на 55 %).

Все кривые хорошо описываются уравнением накопления радона в соответствии с законом радиоактивного распада.

$$C(t) = C_{\max} \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot t)] + C_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t), (1)$$

где C_{\max} – равновесная концентрация радона в эманационном контейнере; C_0 – начальная концентрация радона; λ – постоянная распада радона-222; t – время.

Используя методы математической статистики, можно определить равновесную концентрацию радона для каждого эксперимента и получить ее зависимость от относительной влажности воздуха (рис.4).

На основании экспериментальных данных с использованием интегральной системы программирования MathCad были получены уравнения регрессии:

$$r(x) = b_0 + b_1 \cdot A, (2)$$

$$f(x) = 2397,5 \ln(A) - 6135,7, (3)$$

где $b_0 = 597,638$; $b_1 = 51,763$; A – влажность.

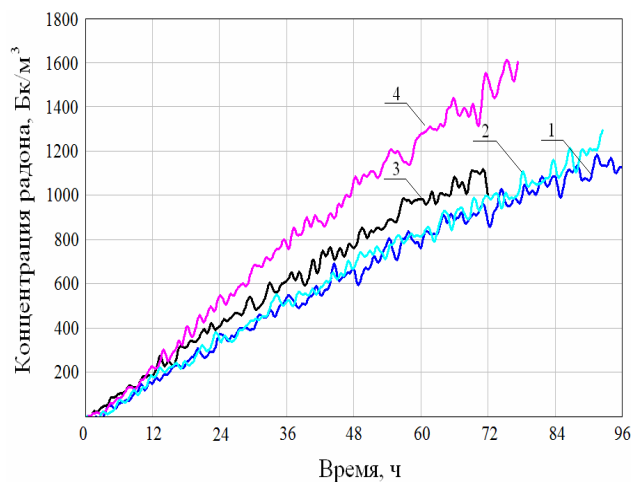


Рис.3. Кривые радоновыделения источника при средней влажности воздуха: 1 – 34,8 %; 2 – 36,6 %; 3 – 38,0 %; 4 – 57,9 %

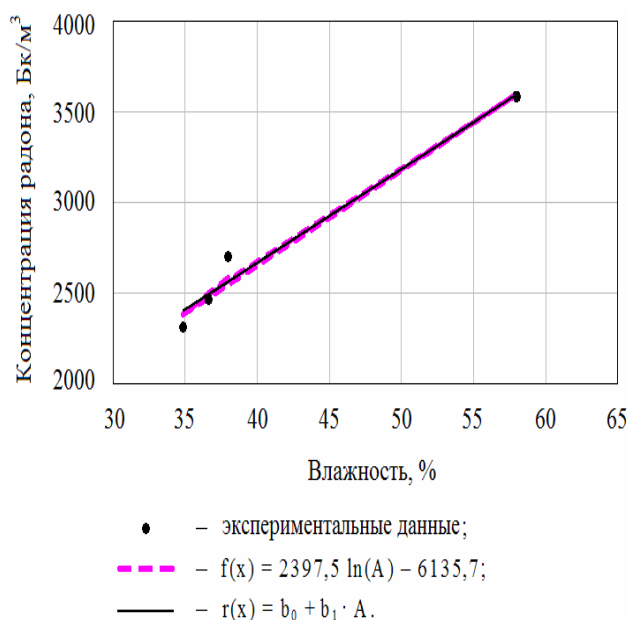


Рис.4. Зависимость значений равновесной концентрации радона от относительной влажности воздуха

Используя полученные уравнения, можно получить значение равновесной концентрации радона в условиях эксперимента при влажности воздуха в диапазоне от 35 до 60 %.

Процесс распространения радона в пористой среде описывается уравнением

$$\frac{\partial C_0}{\partial t} = \lambda \cdot C_{\text{макс}} - \lambda \cdot C_0 + D \cdot \frac{\partial^2 C_0}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где $C_{\text{макс}} = C_{Ra} \cdot \eta \cdot \rho / p$ – максимальная объёмная активность радона в воздухе, находящемся в порах материала, Бк/м³; C_{Ra} – удельная активность радия в материале, Бк/кг; ρ – плотность материала, кг/м³; η – коэффициент эманирования; λ – постоянная распада радона-222, с⁻¹; D – коэффициент диффузии радона, м²/с.

Решение уравнения хорошо известно и для принятых условий эксперимента имеет вид

$$\theta = 1 - \frac{\cos \sqrt{Pd} \cdot \frac{x}{h}}{\cos \sqrt{Pd} - \frac{1}{H} \cdot \sqrt{Pd} \cdot \sin \sqrt{Pd}} \cdot \exp(-PdFo) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\left(1 - \frac{\mu_n^2}{Pd}\right)} \cdot \cos \mu_n \cdot \frac{x}{R} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo), \quad (5)$$

где H – коэффициент, учитывающий условия газообмена в пограничном слое на границе раздела сред «воздух» – «образец»; μ_n – бесчисленное множество корней характеристического уравнения $ctg \mu_n = H \mu_n$; $Pd = \lambda \cdot h^2 / D$ – критерий Предводителя; $Fo = D \cdot t / h^2$ – диффузионный критерий Фурье; A_n – постоянные амплитуды, определяемые соотношением

$$A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}, \quad (6)$$

Решение уравнения (5) аналогично общеизвестной формуле, описывающей распределение температуры внутри тела и удельный расход тепла.

Расчетные значения D , полученные по формуле (5), хорошо сопоставимы со значениями, полученными по методике авторов В.М. Бондаренко, Н.В. Демина и В.С. Рогалиса. Максимальное расхождение результатов не превышает 10 %. На основании этого можно констатировать, что эффективный коэффициент диффузии радона материалов можно определять нестационарным методом по кинетике его накопления, используя формулу (5).

Зная толщину образца и время прохождения сквозь него эманации, можно оценить скорость ее перемещения в условиях эксперимента. Такую оценку можно провести по времени поступления первых порций радона, прошедших сквозь образец, создающих уверенно аномальные значения.

Время прохождения радона сквозь образец зависит от его толщины и состава исследуемого материала. На рис.5 представлены кривые накопления радона при прохождении сквозь образцы в течение первых суток эксперимента. Хорошо видно, что при диффузии сквозь образец из цементно-песчаного раствора толщиной 35 мм первые порции эманации начинают поступать уже спустя 3,5 часа после начала эксперимента. При увеличении толщины образца того же состава до 58 мм время прохож-

дения радона возрастает до 8 часов. Для образца из тяжелого бетона толщиной 96 мм, что приближается к реальным толщинам цементных монолитных стяжек, это время не превышает 10 часов.

Средняя скорость прохождения эманации зависит от величины КД, что хорошо подтверждается результатами эксперимента. На рис.6 представлен график зависимости линейной скорости прохождения эманации от \ln коэффициента диффузии радона.

Между этими параметрами существует плотная положительная корреляционная связь. Коэффициент диффузии радона можно рассчитать по формуле

$$y = 0,0567 \cdot x^{1,1395}, \quad (7)$$

где x – скорость прохождения эманации.

Таким образом, зная скорость прохождения эманации через образец по формуле (7), полученной при испытаниях на стандартном оборудовании (радиометры радона AlphaGUARD PQ2000), рекомендованном для прецизионных измерений, можно рассчитать КД радона цементных композиций толщиной 30...100 мм уже после 5...12 часовой экспозиции.

Применение формул (5) и (7) позволит в десятки раз сократить время проведения эксперимента, так как существующие методы определения КД радона в пористых материалах основываются на оценке равновесных концентраций по обе стороны исследуемого материала.

Представляется целесообразным использование известного эффекта кольматации пор продуктами гидратации цемента для снижения радонопроницаемости цементных бетонов и растворов. С целью решения данной задачи в ходе работы проводились специальные исследования, направленные на оценку изменения радонопроницаемости цементно-песчаного раствора после нанесения на него в процессе формования дополнительного слоя гипсового теста. В качестве материала для дополнительного слоя, создающего условия для формирования высокосуль-

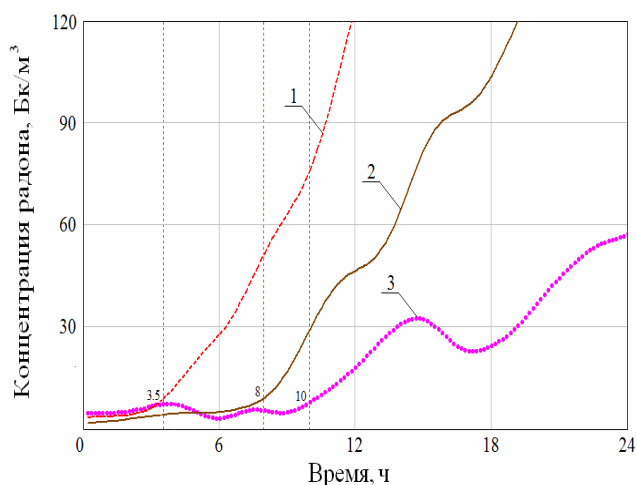


Рис.5. Нарастание концентрации радона во времени в приемной камере при прохождении сквозь образцы: 1 – цементно-песчаного раствора толщиной 35 мм; 2 – цементно-песчаного раствора толщиной 58 мм; 3 – тяжелого бетона толщиной 96 мм

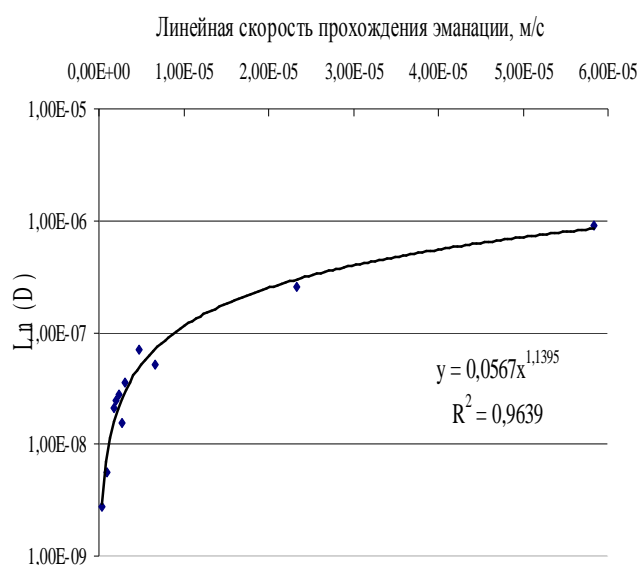


Рис.6. Зависимость линейной скорости прохождения эманации сквозь образец исследуемого материала от \ln КД радона

фатной формы гидросульфоалюмината кальция (ГСАК), на границе раздела слоев также применяли гипсосодержащий отход в виде кека.

Исследование влияния гипсовых покрытий на состав проводили методами рентгенофазового и дифференциально-термического анализов. Нами установлено, что на границе раздела фаз между гипсом и цементно-песчаным раствором образуется дополнительное количество ГСАК, который в результате значительного содержания воды в кристаллической решетке занимает больший объем, чем исходные компоненты, необходимые для его образования. Образуюсь в поровом пространстве поверхностного слоя бетона толщиной не более 2-3 мм, ГСАК кольтматрирует поры, что и является, на наш взгляд, причиной резкого снижения диффузии радона через образцы. Результаты испытаний и составы образцов цементно-песчаного раствора с нанесением дополнительного слоя гипсового теста и кека различной толщины представлены в табл.4.

Таблица 5

Составы и расчетный коэффициент диффузии образцов цементно-песчаного раствора с нанесением дополнительного гипсосодержащего слоя

Материал	Состав			Толщина, м		Расчетный коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$
	Цемент, кг	Песок, кг	Вода, л	Цементно-песчаный раствор	Покрытие	
Цементно-песчаный раствор, покрытый гипсовым тестом (В/Г = 0,55)	479	1436	335	0,035	0,015	$1,83 \cdot 10^{-8}$
Цементно-песчаный раствор, покрытый гипсовым тестом (В/Г = 0,55)	479	1436	335	0,060	0,005	$2,08 \cdot 10^{-8}$
Цементно-песчаный раствор, покрытый гипсовым тестом (В/Г = 0,6)	472	1417	331	0,042	0,020	$3,97 \cdot 10^{-8}$
Цементно-песчаный раствор, покрытый кеком (В/К = 1,3)	479	1436	335	0,035	0,010	$0,49 \cdot 10^{-8}$
Цементно-песчаный раствор, покрытый кеком (В/К = 1,3)	472	1417	331	0,042	0,010	$2,50 \cdot 10^{-8}$

Из табл.5 видно, что увеличение толщины гипсового покрытия образца не повышает его диффузионного сопротивления по радону. Это связано с высокой радонопроницаемостью гипсового камня. Таким образом, для достижения эффекта резкого снижения КД цементных бетонов и растворов достаточно обеспе-

чить условия для образования ГСАК в контактной зоне цементной композиции с гипсовым покрытием и таким образом обеспечить целостность основной структуры материалов.

В среднем эффективный коэффициент диффузии у строительных растворов, обработанных гипсом или кеком, почти в 1,8 раза меньше КД цементных бетонов и в 3,2 раза меньше, чем у цементно-песчаных растворов (рис.7).

Глава 4 посвящена разработке составов бетонов с пониженным радоновыделением и исследованиям влияния попеременного замораживания и оттаивания на выход радона из тяжелого и ячеистого автоклавного бетона.

Для получения цементных бетонов, эффективных по радиационному качеству, в виде заполнителей следует применять материалы с низкой естественной радиоактивностью и пониженным эманированием. По результатам гамма-спектрометрического анализа (табл.3) выявлено, что в качестве таких материалов целесообразно использовать горнблендит, сидерит и мрамор в виде щебня и песка, а также тонкомолотый доломит как минеральную добавку.

По результатам специальных эманационных испытаний разработанных составов низкоэманирующих бетонов выявлено, что наибольший выход радона наблюдается из бетона на кварцевом заполнителе (рис.8). Бетон с горнблендитовым заполнителем, доломитовым песком и добавкой ЛСТ является наиболее эффективным по радиационному качеству. Снижение эманирующей способности по радону относительно контрольного образца составило более 60 %, а удельной эффективной активности более 81 %. Эманирование бетонов на мраморных и сидеритовых заполнителях несколько выше, однако оно в 2 раза меньше аналогичного показателя традиционного бетона на кварцевом заполнителе.

Вследствие гидравлической активности эманирование бетонов и растворов с течением времени может изменяться. Ранее были установлены закономерности изменения эманирования цементных бетонов в зависимости от состава, степени гидратации цемента, а также возраста бетона и технологических параметров его

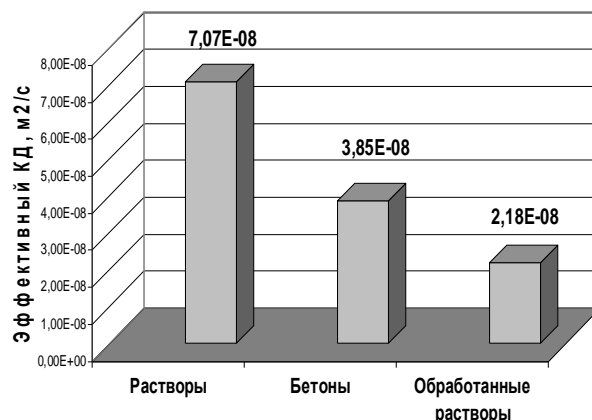


Рис.7. Средние значения эффективных коэффициентов диффузии цементных бетонов и растворов и растворов, обработанных гипсовым тестом или кеком

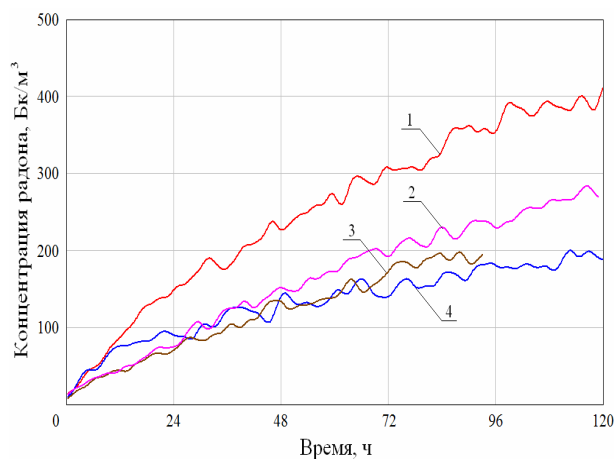


Рис.8. Кривые радоновыделения образцов-кубов тяжелого бетона: 1 - с кварцевым заполнителем; 2 - с сидеритовым заполнителем и добавкой ЛСТ; 3 - с мраморным заполнителем; 4 - с горнблендитовым заполнителем, доломитовым песком и добавкой ЛСТ

изготовления. Однако исследований по оценке влияния условий эксплуатации и в первую очередь морозного воздействия на эманирование строительных материалов в отечественной и зарубежной литературе нами не обнаружено. Эти исследования особенно актуальны при прогнозировании радоновыделения из бетонных и железобетонных конструкций в процессе эксплуатации зданий в районах с суровыми климатическими условиями.

На рис.9 представлены кривые радоновыделения образцов-кубов из тяжелого бетона, а на рис.10 графики изменения значений коэффициентов эманирования по радону во времени при проведении экспериментов. На рис.10 видно, что отношение количества атомов радона, вышедших из образца, к количеству образовавшихся в результате радиоактивного распада становится постоянным уже через

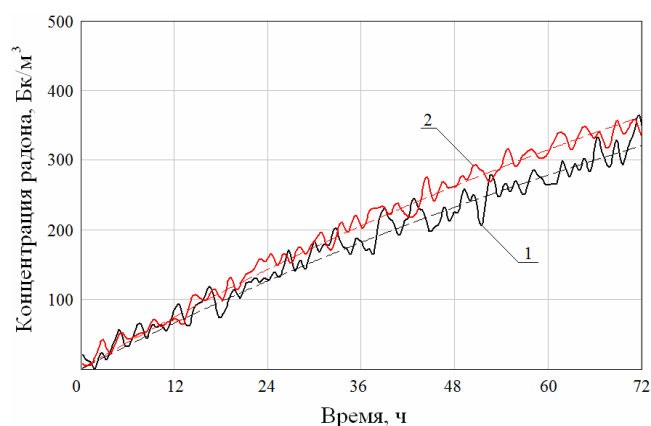


Рис.9. Радоновыделение образцов-кубов тяжелого бетона: 1 – не подвергавшихся испытаниям на морозостойкость; 2 – после 150 циклов замораживания и оттаивания

18 часов. Этот эффект наблюдается как для контрольных образцов, так и для образцов, подвергнутых испытаниям.

На рис.11 в виде графика представлено изменение коэффициента эманирования тяжелого бетона в зависимости от количества циклов попеременного замораживания и оттаивания.

Значение коэффициента эманирования образцов тяжелого бетона увеличилось с 0,162 до 0,174, приблизительно на 7%. Выход радона из образцов при испытаниях увеличивается практически пропорционально в течение 90 циклов испытаний, после чего практически не изменяется до окончания наблюдений.

Известно, что вода, превращаясь в лед, увеличивается в объеме и при замерзании в порах и капиллярах цементного камня вызывает значительные

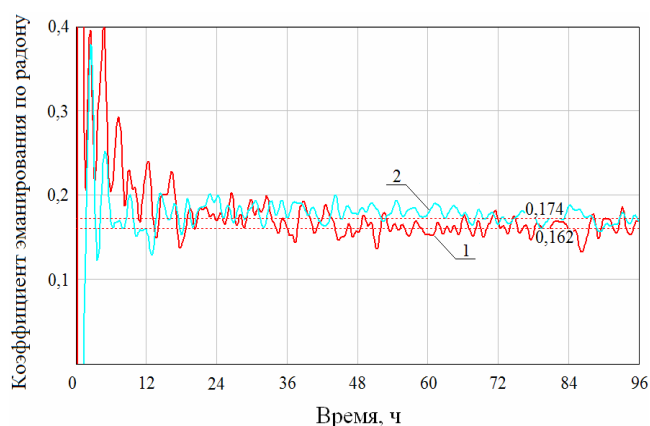


Рис.10. Изменение коэффициента эманирования по радону образцов-кубов тяжелого бетона при проведении экспериментов: 1 – не подвергавшихся испытаниям на морозостойкость; 2 – после 150 циклов замораживания и оттаивания

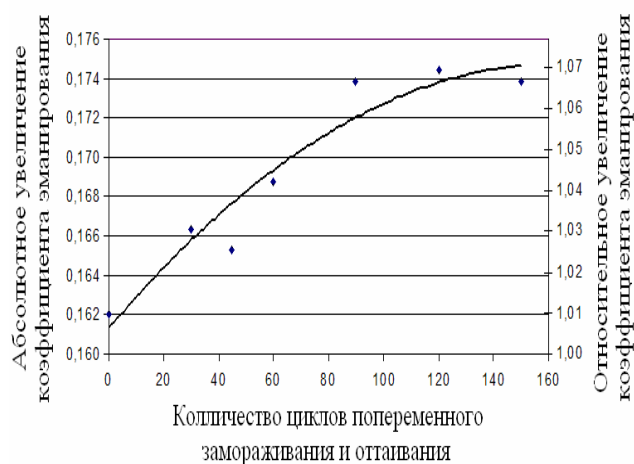


Рис.11. Влияние испытаний на морозостойкость на выход радона из тяжёлого бетона

внутренние напряжения. Частые теплосмены приводят к постепенному расшатыванию структуры цементного камня и бетона, объемному расширению, появлению и объединению микротрещин, снижению прочности. Таким образом, становится возможным поступление наружу дополнительного количества атомов радона от зерен крупного и мелкого заполнителя по образовавшимся микротрещинам. Косвенно подтверждает это характер морозного разрушения образцов, которое в большинстве случаев происходит по наиболее слабому месту - контакту цементного раствора с крупным заполнителем.

В наблюдаемом случае, по всей видимости, уже через 90 циклов испытаний на морозостойкость образцы достигают такой степени разрушения, при которой атомы радона, эманулирующие из крупного заполнителя, свободно выходят из материала.

Действительно, диаметр атома радона ($0,44 \cdot 10^{-9}$ м) меньше размера микропор цементных бетонов ($1 \cdot 10^{-9} \dots 2 \cdot 10^{-9}$ м), что позволяет последним накапливаться в поровом пространстве материала. В результате морозного разрушения размеры микропор увеличиваются, образуется дополнительное количество капиллярных пор и микротрещин, которые, объединяясь между собой, создают гораздо более благоприятные условия для диффузии радона от крупного заполнителя наружу.

Обнаруженный эффект, на наш взгляд, может быть положен в основу новых перспективных методов испытаний строительных материалов.

В отличие от тяжелого бетона эманирование образцов газобетона автоклавного твердения уменьшается с увеличением количества циклов замораживания и оттаивания (рис. 12, 13). Кроме того, стабилизация отношения количества атомов радона, вышедших из образца, к количеству образовавшихся в результате радиоактивного распада для образцов, прошедших испытания, наблюдается уже через 12 часов. Для образцов, не подвергнутых испытаниям, период стабилизации значительно больше и составляет почти 42 часа.

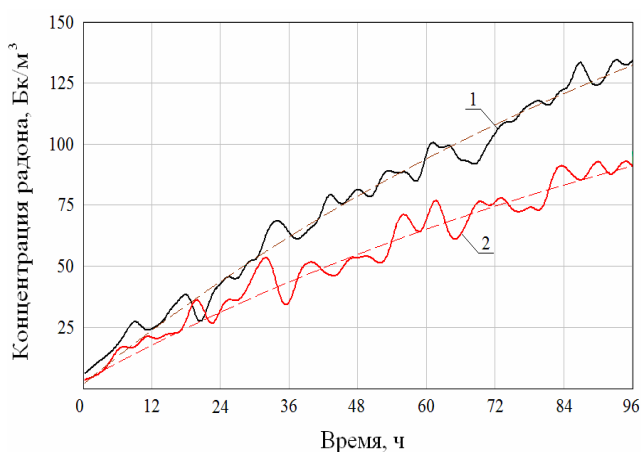


Рис.12. Радоноразделение образцов газобетона автоклавного твердения: 1 – не подвергавшихся испытаниям на морозостойкость; 2 – после 30 циклов замораживания и оттаивания

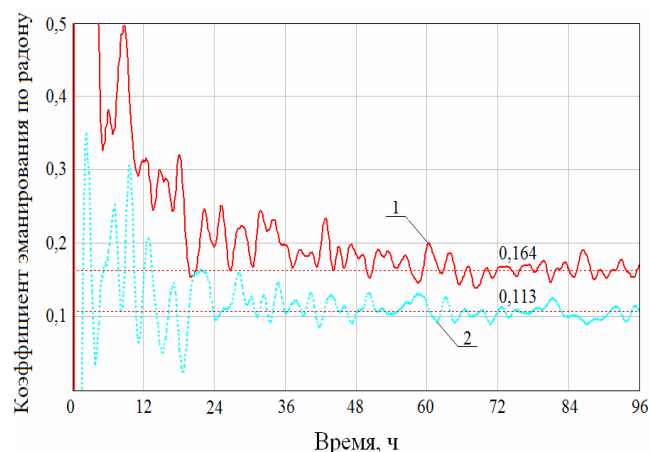


Рис.13. Изменение коэффициента эманирования по радону образцов газобетона автоклавного твердения: 1 – не подвергавшихся испытаниям на морозостойкость; 2 – после 30 циклов замораживания и оттаивания

Коэффициент эманирования образцов в процессе испытаний уменьшился с 0,164 до 0,114, приблизительно на 31 % (рис.14). Выход радона из образцов при испытаниях уменьшается практически пропорционально в течение 8-10 циклов испытаний, после чего практически не изменяется до окончания наблюдений.

В газобетоне автоклавного твердения отсутствуют зёрна крупного и мелкого заполнителя. Минералогический состав газобетона представлен в основном кристаллической фазой: остатками зерен песка и низкоосновными гидросиликатами кальция.

В процессе испытаний, с одной стороны, изменяется структура автоклавного бетона, сопровождающаяся вскрытием ранее закрытых пор, что обеспечивает выход дополнительного количества атомов радона, а с другой стороны, гидросиликаты кальция подвергаются воздействию смеси углекислого газа, воды и водяных паров, в результате чего происходит карбонизация гидратированных силикатов кальция.

Таким образом, уменьшение эманирования обусловлено, по всей видимости, процессом карбонизации гидросиликатов кальция при испытаниях на морозостойкость. Этот вывод хорошо согласуется с данными, полученными другими исследователями, по оценке уменьшения эманирования тяжелого бетона в процессе его длительного хранения на воздухе, сопровождающегося карбонизацией, и теоретическим расчетом длины пробега атомов радона в $C-S-H$ (1), C_2SH и $CaCO_3$ который у последнего минерала оказался почти в 1,3 раза меньшим, чем у гидросиликатов кальция автоклавного твердения.

Глава 5 посвящена оценке целесообразности применения разработанных низкоэманирующих бетонов и противорадионных барьеров при строительстве зданий.

В России жилищный фонд представлен преимущественно многоэтажными зданиями из кирпича и сборного железобетона. В этой связи для реализации расчета было выбрано здание из сборного железобетона серии 111-97.00. С целью оценки вклада строительных материалов в формирование концентрации радона в воздухе жилых помещений были проведены специальные эксперименты по определению фактической ППП с поверхности внутренних несущих стен и ограждающих конструкций.

На рис.15 представлены кривые выхода радона из типовых панелей, выполненных из тяжелого бетона на кварцсодержащем заполнителе и керамзитовом заполнителе. При выходе радона из керамзитобетонной панели равновесие наступает уже к 48 часам экспозиции, а из панели на кварцсодержащем заполнителе только к 96 часам.

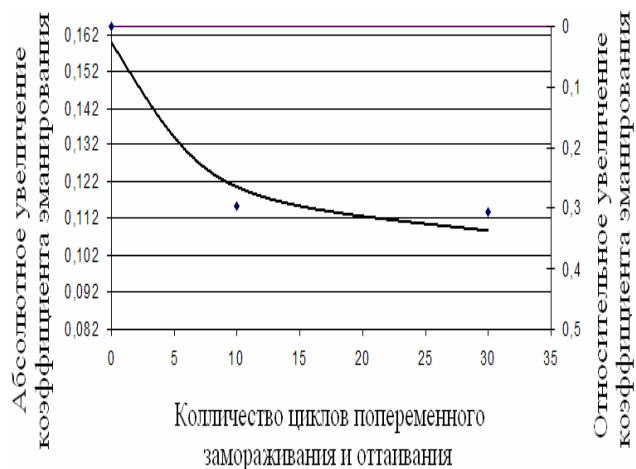


Рис.14. Влияние испытаний на морозостойкость на выход радона из автоклавного газобетона

ППР рассчитывали по формуле

$$\text{ППР} = (C_1 - C_0) \cdot (V_{\text{кам}} - V_{\text{приб}}) / (S \cdot t), \quad (7)$$

где C_0 и C_1 – начальная и конечная, соответственно, концентрации радона на прямом участке восходящей кривой накопления в камере-емкости, закрепленной на поверхности конструкции, Бк/м³; $V_{\text{кам}}$ – объем камеры-емкости, м³; $V_{\text{приб}}$ – объем измерительного прибора, м³; S – площадь соприкосновения емкости с конструкцией, м²; t – время изменения концентрации радона от значения C_0 до C_1 , ч.

По результатам расчетов нами установлено, что вклад тяжелого бетона в формирование концентрации радона составляет около 59 % для 1 и 2-комнатных квартир и около 54 % для 3-комнатных. Расчетная величина вклада керамзитобетонных конструкций не превышает 3 и 6 %, соответственно. Это объясняется разным удельным расходом тяжелого и легкого бетона при строительстве таких зданий, а также различной эманулирующей способностью этих материалов, значение которой у тяжелого бетона в 2,5 раза выше.

Общий вклад железобетонных строительных конструкций в формирование концентрации радона в помещениях зданий серии 111-97.00 составляет около 30%.

По результатам расчета вероятной концентрации радона установлено значительное её снижение в квартирах домов, возведенных с применением тяжелых бетонов предлагаемых нами составов по отношению к бетонам на традиционном кварцевом заполнителе.

Значение суммарной дозы в здании из сборного железобетона с применением бетона на кварцевом заполнителе составило 1,001 мЗв/год, а для бетона с горнблентитовым заполнителем и добавкой ЛСТ – 0,58 мЗв/год. Эффект снижения суммарной дозы облучения за счет применения предложенных составов бетонов составил 42%. Это обстоятельство указывает на реальную возможность снижения дозы облучения путем улучшения радиационно-гигиенических свойств строительных материалов и на их существенный вклад в формирование суммарной дозы облучения населения.

Для решения задачи повышения степени защищенности здания от проникновения почвенного радона на основании специальных исследований, приведенных в главе 3, и согласно СНиП 2.03.13-88 «Полы» разработаны конструктивные схемы полов с пониженной радонопроницаемостью, способных выполнять функции эффективного противорадонового барьера.

Предлагаемые составы растворов с пониженной радонопроницаемостью приняты к практическому применению в строительстве.

Применение таких противорадоновых барьеров, обладающих пониженной радонопроницаемостью в сравнении с традиционными, обеспечит снижение уровня облучения населения в помещениях зданий.

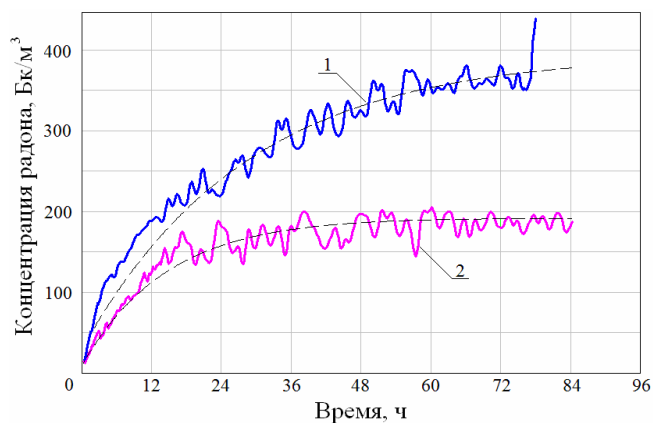


Рис.15. Кривые выхода радона из типовых панелей выполненных: 1 – из бетона на кварцосодержащем заполнителе; 2 – из бетона на керамзитовом заполнителе

Основные выводы

1. Среднее значение ППР на участках застройки в г. Красноярске составляет 54,4 мБк/с·м². Установлена расчетная верхняя граница доверительного интервала плотности потока радона, которая оказалась равной 100 мБк/с·м². Это значение на 25 % превышает нормативное (80 мБк/с·м²), рекомендованное основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности при отводе земельных участков под строительство жилых домов и зданий социально-бытового назначения. Этот норматив превышают свыше 350 значений, что составляет почти 12 % выборки.

2. Снижение радонопроницаемости цементных бетонов и растворов возможно путем целенаправленного образования дополнительного количества высокосульфатной формы гидросульфатоалюмината кальция и эффекта кольматации пор в контактной зоне «цементно-песчаный раствор – гипсовый камень». Применение гипса и гипсосодержащего кека с содержанием гипса в количестве 22...27% в качестве элемента радонозащитного барьера позволяет уменьшить эффективный коэффициент диффузии радона в среднем в 3,2 раза.

3. При увеличении влажности воздуха на 66% эманирование природного источника радона возрастает на 55%. Используя полученную аналитическую зависимость влияния влажности окружающей среды на эманирование источника, можно получить значение равновесной концентрации радона в условиях эксперимента.

4. Радоновыделение и коэффициент эманирования тяжелого бетона увеличивается с увеличением количества циклов замораживания и оттаивания. Увеличение эманирования тяжелого бетона происходит в основном из-за разрушения его структуры при замораживании и оттаивании, способствующее поступлению наружу дополнительного количества атомов радона от зерен крупного и мелкого заполнителя.

5. Эманирование газобетона автоклавного твердения уменьшается с увеличением количества циклов замораживания и оттаивания, что, по всей видимости, обусловлено преобладанием процесса карбонизации гидросиликатов кальция при испытаниях на морозостойкость.

6. Наибольшая эффективность снижения концентрации радона в помещениях зданий (на 54%) наблюдается при использовании бетона с горнблентитовым заполнителем в сочетании с доломитовым песком и добавкой ЛСТ. Этот показатель можно повысить путем выбора вяжущего с минимальными значениями удельного радоновыделения, а также снижения его расхода за счет известных технологических приемов. Значение суммарной дозы в здании из сборного железобетона с применением традиционного бетона на кварцевом заполнителе составило 1,001 мЗв/год, а с применением предлагаемого состава – 0,58 мЗв/год. Эффект снижения суммарной дозы облучения таким образом составляет 42%.

7. Внедренные в строительную практику разработанные конструктивные схемы полов способны выполнять функции эффективного противорадонового барьера. Применение таких конструкций обеспечит снижение уровня облучения населения в помещениях зданий.

Содержание работы отражено в 24 публикациях. Основные из них:

1. Цементные бетоны и растворы экологически чистые по радиационному фактору / И.В. Тарасов, Е.В. Пересыпкин, С.А. Кургуз, Р.А. Назиров // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сб. материалов IV Международ. науч.-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, 2005. С. 325-327.

2. Назиров, Р.А. Результаты оценки плотности потока радона из грунта и его концентрации в воздухе помещений на территории Красноярского края / Р.А. Назиров, И.В. Тарасов, С.А. Кургуз // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: сб. материалов Всероссийской науч.-практ. конф. – Красноярск: КГТУ, 2006. С. 150-155.

3. Низкоэманулирующий цементный бетон / Р.А. Назиров, И.В. Тарасов, Е.В. Пересыпкин, С.А. Кургуз // Материалы 4-й международной науч.-практ. конф. «Бетон и железобетон в третьем тысячелетии»: Южное регион. отд-ние РААСН. – Ростов-на-Дону, 2006. С. 313-318.

4. Новые принципы формирования слоя для радонозащитных покрытий / С.А. Кургуз, Р.А. Назиров, И.В. Тарасов, Е.В. Пересыпкин // Сб. трудов XIII Международ. семинара Азиатско-Тихоокеанской академии материалов «Строительные и отделочные материалы. Стандарты XXI века» – Новосибирск: НГАСУ (Сибст-рин), 2006. С. 115-119.

5. Пассивные радонозащитные системы зданий / Р.А. Назиров, И.В. Тарасов, С.А. Кургуз, Е.В. Пересыпкин // Сб. трудов XIII Международ. семинара Азиатско-Тихоокеанской академии материалов «Строительные и отделочные материалы. Стандарты XXI века» – Новосибирск: НГАСУ, 2006. С. 161-163.

6. Снижение естественной радиоактивности цементных бетонов / Р.А. Назиров, Е.В. Пересыпкин, И.В. Тарасов, В.И. Верещагин // Изв. Вузов. Строительство. – Новосибирск: НГАСУ, 2007. С. 45-49.

7. Тарасов, И.В. Определение коэффициента диффузии радона в цементных бетонах и растворах / И.В. Тарасов // Сб. материалов науч.-практ. конф. «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях» - М.: МГСУ, 2007. С. 59-60.

8. Тарасов, И.В. Ограничение поступления почвенного радона в воздух помещений зданий как основной фактор снижения облучения населения / И.В. Тарасов, С.А. Кургуз, В.А. Воеводин // Материалы 7-й межрегион. науч.-практ. конф. – Омск, 2007. С. 17-21.

9. Основные данные по районированию территории города Красноярска по степени радоновой опасности / А.В. Акимова, В.А. Воеводин, И.В. Тарасов, С.А. Кургуз, В.А. Чечеткин, М.В. Болотова // Материалы 59-й республикан. науч. конф. – Казань: КГАСУ, 2007. С. 150-153.

10. Назиров, Р.А. Цементный бетон с низкой естественной радиоактивностью / Р.А. Назиров, Е.В. Пересыпкин, И.В. Тарасов // Технологии бетонов. 2008. - №3. – С. 8-9.

11. Назиров, Р.А. Исследования влияния попеременного замораживания и оттаивания на выход радона из тяжелого бетона / Р.А. Назиров, И.В. Тарасов // Технологии бетонов. 2008. - №5. – С. 58-60.

12. Пат. № 2333174 Российская Федерация. Цементный бетон / Р.А. Назиров, Е.В. Пересыпкин, В.И. Верещагин, И.В. Тарасов, С.А. Кургуз, В.А. Воеводин. № 2006145508/03; заявл. 20.12.2006.; опубл. 10.09.2008. Бюл. №25. – 4 с.

13. Тарасов, И.В. Регулирование радоновыделения из цементных бетонов и растворов / И.В. Тарасов // Композиционные строительные материалы. Теория и практика: сб. ст. Международ. науч.-техн. конф., посвященной 50-летию Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. – Пенза, 2008. С. 260-262.

14. Тарасов, И.В. Разработка высокоэффективных цементных монолитных радонозащитных барьеров / И.В. Тарасов // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сб. ст. VII Международ. науч.-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, 2008. С. 192-195.

Тарасов Игорь Владимирович

**ЦЕМЕНТНЫЕ БЕТОНЫ И РАСТВОРЫ
С ПОНИЖЕННОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТЬЮ
И РАДОНОПРОНИЦАЕМОСТЬЮ**

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 08.10.08 г. Формат 60?84 1/16.
Усл. печ. л. 1,31. Тираж 100 экз. Заказ № ____
Отпечатано на ризографе ИГУРЭ СФУ.
660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 82.