

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт

институт

Проектирование зданий и экспертиза недвижимости

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ Р.А. Назиров

подпись

инициалы, фамилия

« _____ » _____ 20 ____ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Формирование естественного радиационного фона
в энергоэффективных зданиях»

тема

08.04.01 «Строительство»

код и наименование направления

08.04.01.04 «Проектирование зданий. Энерго- и ресурсосбережение»

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

Д.т.н., профессор

Р.А. Назиров

подпись, дата

должность, ученая степень

инициалы, фамилия

Выпускник

Е.Д. Гуненко

подпись, дата

инициалы, фамилия

Рецензент

подпись, дата

должность, ученая степень

инициалы, фамилия

Красноярск 2020

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт

институт

Проектирование зданий и экспертиза недвижимости

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ Р.А. Назиров

подпись инициалы, фамилия

« _____ » _____ 20 ____ г.

ЗАДАНИЕ

НА МАГИСТЕРСКУЮ ДИССЕРТАЦИЮ

Студенту Гуненко Евгении Дмитриевне

фамилия, имя, отчество

Группа СФ 18-04М Направление (специальность) 08.04.01 Строительство

номер

код и наименование

08.04.01.04 «Проектирование зданий. Энерго- и ресурсосбережение»

код и наименование

Тема магистерской диссертации «Формирование естественного радиационного фона в энергоэффективных зданиях»

Утверждена приказом по университету № 16412/с от 25 октября 2018 г.

Руководитель магистерской диссертации Р.А. Назиров, заведующий кафедры

инициалы, фамилия, должность, ученое звание

ПЗиЭН, д.т.н., профессор

и место работы

Исходные данные для магистерской диссертации: нормативно-правовые документы, регламентирующие соблюдение основных норм радиационной безопасности и обеспечивающие безопасность населения на территории РФ, учебники, справочники, методические пособия, диссертации, научные статьи, доклады и отчеты, материалы конференций и семинаров, справочные данные сети интернет, материалы научно-исследовательской практики.

Перечень разделов магистерской диссертации:

- Введение;
- Глава 1. Состояние вопроса и выбор основного направления исследования;
- ГЛАВА 2. Методология исследования, оборудование и характеристика материалов;
- ГЛАВА 3. Результаты экспериментального исследования и оценка полученных данных;
- ГЛАВА 4. Моделирование процессов переноса радона системы грунт-атмосфера-здание с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics;
- ГЛАВА 5. Мероприятия по защите от радона;
- Заключение;
- Список использованных источников;
- Перечень графического материала презентация.

Руководитель ВКР

подпись

Р.А. Назиров
инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению

подпись

Е.Д. Гуненко
инициалы, фамилия

« _____ » _____ 20__ г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. Состояние вопроса и выбор основного направления исследования	11
1.1 Источники ионизирующего излучения.....	11
1.2 Характеристика радона как основного источника природного об- лучения.....	14
1.3 Регулирование в области радиационной безопасности.....	15
1.4 Формирование естественного радиационного фона в помещениях зда- ний.....	19
1.4.1 Концентрация радона в воздухе помещений.....	19
1.4.2 Содержание естественных радионуклидов в составе минерального сырья и строительных материалах.....	21
1.4.3 Исследования в области эманирования горных пород и строитель- ных материалов.....	24
1.4.4 Влажностный режим помещений.....	28
ГЛАВА 2. Методология исследования, оборудование и характеристика мате- риалов	31
2.1 Определение удельной активности естественных радионуклидов гам- ма-спектрометрическим методом.....	31
2.2 Измерение объемной активности радона на многопараметрическом радоновом монитор-дозиметре «AlphaGUARD PQ2000».....	33
2.3 Механизм эксхалляции радона и концентрации радона в воздухе поме- щений.....	37
ГЛАВА 3. Результаты экспериментального исследования и оценка получен- ных данных	40
ГЛАВА 4. Моделирование процессов переноса радона системы грунт- атмосфера-здание с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics	45
4.1 Исходные данные.....	45

4.2	Определение плотности потока радона.....	48
4.3	Определение длины диффузии радона.....	53
4.4	Скорость поступления радона в воздух помещения.....	54
4.5	Распределение концентраций радона в воздухе помещений.....	56
ГЛАВА 5. Мероприятия по защите от радона.....		62
5.1	Определение требуемой кратности воздухообмена в здании и расчет энергозатрат.....	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		71
Список использованных источников.....		74

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из основных направлений в строительной отрасли является обеспечение энерго- и ресурсосбережения, а также обеспечение экологической безопасности строительства. С принятием ФЗ «Об энергосбережении» и введением Приказа МинСтроя «Об утверждении требований энергетической эффективности зданий» наблюдается ужесточение требований к обеспечению энергоэффективности.

Одним из требований к безопасности зданий [1] является требование безопасных для здоровья человека условий проживания и пребывания в зданиях и сооружениях. Показателем радиационной безопасности является уровень ионизирующего излучения, обусловленного присутствием радона и дочерних продуктов его распада (ДПР) в воздухе помещений.

При воздействии на организм человека ионизирующая радиация способна вызывать два вида эффектов: детерминированные эффекты, в отношении которых предполагают существование порога, ниже которого эффект отсутствует, а при превышении которого тяжесть эффекта зависит от дозы, и стохастические эффекты, не имеющие дозового порога возникновения. Вероятность возникновения стохастических эффектов пропорциональна дозе, тяжесть проявления заболевания, при этом, от дозы не зависит. С увеличением дозы повышается не тяжесть эффектов, а вероятность их появления. Система радиационной защиты основана на выполнении двух условий: полном предотвращении детерминированных эффектов и снижении риска отдалённых (стохастических) эффектов до приемлемого уровня [2].

В помещениях зданий человек постоянно подвергается воздействию внешнего гамма-излучения, обусловленного естественной радиоактивностью строительных материалов, а также внешним и внутренним облучением человека радоном и дочерними продуктами его распада.

Основными источниками поступления радона в воздух помещений являются грунты под зданием и эманирование строительных конструкций. В

том или ином количестве радон может содержаться в атмосферном воздухе, воде и в топливных ресурсах, при сжигании которых способен выделяться в воздух помещений. При этом, концентрация радона в воздухе в значительной степени зависит от величины воздухообмена в помещении. В настоящее время нормативной документацией установлено предельное значение среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности радона и торона, а также продуктов их распада в воздухе помещений вновь строящихся жилых и общественных зданий на уровне 100 Бк/м^3 . Для эксплуатируемых зданий эта величина не должна превышать 200 Бк/м^3 .

Величина концентрации радона в атмосферном воздухе и воздухе помещений за счет эманирования радона из грунта и строительных конструкций зависит от содержания естественных радионуклидов, параметров окружающей среды, таких как температура, влажность и давление, а также свойств грунта и применяемых строительных материалов.

В свою очередь, значения относительной влажности воздуха в помещениях зданий зависят от функционального назначения помещения, зоны влажности, в которой расположен объект строительства, и могут варьироваться в широких пределах в зависимости от режима работы систем отопления и вентиляции, а также погодных условий.

Требования к обеспечению энергетической эффективности зданий достигаются за счет снижения расхода невозобновляемых топливно-энергетических ресурсов и применения эффективных теплоизоляционных материалов. Необходимо отметить, что повышенная герметизация помещений, обусловленная применением теплоизоляционных материалов, способствует ухудшению естественной вентиляции радона.

Так, практический интерес представляет выявление зависимости содержания радона в воздухе от влажностного режима помещений и возможность снижения концентраций до установленных нормами уровней за счет увеличения кратности воздухообмена.

Предмет исследования – формирование естественного радиационного фона в энергоэффективных зданиях и эманирование строительных материалов в воздух помещений.

Целью работы являлось прогнозирование концентраций радона в воздухе при различном влажностном режиме помещений с использованием методов компьютерного моделирования и оценка энергозатрат на обеспечение радонобезопасности.

Для решения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

1. анализ существующих исследований, направленных на выявление параметров, формирующих естественный радиационный фон в здании;
2. анализ правовой и нормативной документации, регулирующей уровень ионизирующего излучения в помещениях зданий;
3. определение коэффициентов эманирования тяжелого бетона с использованием гамма-спектрометрических и эманиционных методов при различных значениях относительной влажности воздуха;
4. получение показателя плотности потока радона с поверхности ограждающих конструкций моделируемого здания в программном комплексе при заданных условиях и расчет средней скорости поступления радона в воздух помещений;
5. получение вероятных концентраций в воздухе помещений с учетом требуемой кратности воздухообмена;
6. определение энергозатрат при увеличении кратности воздухообмена как мероприятия, направленного на снижение концентраций радона в воздухе помещений.

Актуальность работы обусловлена повышением энергоэффективности зданий и сооружений и, как следствие, увеличением радоновой нагрузки на население при повышенных значениях относительной влажности воздуха в

помещениях зданий. Вопрос особенно актуален для северных территорий и регионов со значительным содержанием естественных радионуклидов в составе минерального строительного сырья и горных пород, а также повышенным радоновыделением из грунтов под зданием.

ГЛАВА 1. Состояние вопроса и выбор основного направления исследования

Активные исследования относительно радиационной безопасности ведутся в мире с середины 20 века. При этом первые исследования на эту тематику, проводимые с начала тридцатых и по конец семидесятых годов, связывались с ионизирующим излучением преимущественно техногенного происхождения. Однако по результатам проведенных в различных странах исследований, было установлено, что радон и дочерние продукты распада вносят наибольший вклад в суммарную дозу облучения населения. Таким образом, доза облучения, полученная при облучении радоном, превосходит дозы, обусловленные другими источниками ионизирующего излучения, в том числе используемыми в здравоохранении и поступившими в окружающую среду в результате деятельности ядерных предприятий. Длительное внутреннее облучение организма дочерними продуктами распада радона является одним из основных причин развития легочных онкопатологий.

Результаты мировых эпидемиологических исследований по оценке рисков возникновения рака легкого от радона в воздухе жилых помещений вызвали необходимость в совершенствовании подходов к регулированию этой проблемы. На основе этого международными организациями была реализована стратегия по защите населения от радоновой проблемы [3].

1.1 Источники ионизирующего излучения

Дозы облучения населения формируются за счет природных, медицинских и техногенных источников ионизирующего излучения. Наибольший вклад в облучение населения вносят непосредственно природные источники радиации. Естественный радиационный фон создается за счет излучения естественных радионуклидов (ЕРН), содержащихся в горных породах, грунтах, строительных материалах, воде и воздухе, а также радионуклидов, присутст-

вующих в организме человека; свой вклад в суммарную дозу облучения населения вносит космическое излучение.

В Таблице 1.1 приведены основные источники облучения населения от природных источников и их годовые дозы.

Таблица 1.1 – Основные источники облучения населения и обусловленные ими эффективные эквивалентные дозы

Источник облучения	Годовая доза, мЗв/год
Природные источники излучения	2,4
Радон в воздухе помещений	1,3
Гамма-излучение ЕРН грунта и стройматериалов	0,4
При поступлении ЕРН в организм человека с водой и пищей	0,4
Космическое излучение	0,3

Космические лучи способны достигать поверхности Земли, взаимодействовать с ее атмосферой, что, в свою очередь, порождает вторичное излучение и приводит к образованию различных радионуклидов. Воздействие космических лучей на земную поверхность неравномерно и зависит от географической широты и высоты местности над уровнем моря. Уровни земной радиации также неодинаковы для разных мест земного шара и зависят от концентрации радионуклидов в определенном участке земной коры, однако, в местах проживания основной массы населения они примерно одного порядка [4].

Расчетные годовые дозы на душу населения за счет конкретных естественных источников представлены в Таблице 1.2 [5].

Таблица 1.2 – Расчетные годовые дозы на душу населения за счет конкретных естественных источников

Источник облучения	Годовая доза, мЗв/год
Радон в воздухе помещений	1,3
Прочие (от ряда U-238 и Th-232)	0,4
Космические лучи	0,37
Калий-40	0,33
Радионуклиды космические	0,015
Рубидий-87	0,006

Основными естественными радионуклидами являются ^{40}K , ^{87}Rb и два ряда радиоактивных элементов, образующихся при распаде урана и тория. Им соответствуют наибольшие значения удельной активности среди естественных радионуклидов, характерных для земной коры.

Присутствие K-40 в организме человека частично обуславливает дозу внутреннего облучения. Эта величина постоянна, регулируется гомеостатически и не зависит от деятельности людей.

Торий относят к числу распространенных элементов, однако, он рассеян в породах и собственных месторождений не образует. Нормирование допустимых концентраций ЕРН в ряду тория производят по Th-232 [6].

Природный уран состоит из смеси трех изотопов: ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U . В процессе последовательных альфа- и бета-распадов изотопов ^{238}U и ^{235}U образуется гелий и стабильные изотопы ^{206}Pb и ^{207}Pb [7].

Важнейшим радиоактивным продуктом распада урана-238 является радий. Его содержание в горных породах незначительно и колеблется от 0,5 до $2,4 \cdot 10^{-10} \%$. В природе радий находится в рассеянном состоянии в минералах урана, занимая непрочное положение в его кристаллической решетке. По этой причине радий легко выщелачивается природными водами, что приводит к накоплению радия в отдельных породах. Нормирование допустимых концентраций в ряду урана осуществляют по Ra-226.

При распаде радия образуется радон – бесцветный инертный газ без запаха, не имеющий стабильных и долгоживущих изотопов. Как видно из представленных данных, на дозу облучения за счет радона приходится более 50% от суммарной дозы всех источников облучения. Наибольшую опасность, при этом, представляет не сам радон, а дочерние продукты его распада – изотопы тяжелых металлов свинца, висмута и полония, которые вносят основной вклад во внутреннее облучение человека.

1.2 Характеристика радона как основного источника природного облучения

В природе при радиоактивном распаде материнских ядер постоянно возникают ядра радона. В небольших количествах он постоянно присутствует в земной коре и почвах.

Радон – наиболее редкий радиоактивный газ, бесцветный, не имеющий запаха. При температуре -62°C превращается в бесцветную жидкость, которая флюоресцирует голубым или фиолетовым цветом. При температуре -71°C радон переходит в твердое состояние, излучающее при этом голубое сияние. Радон – тяжелый газ; он в 110 раз тяжелее водорода, в 55 раз – гелия, и в 7,5 раз тяжелее воздуха. Радон способен выделяться из почвы, воды, минерального сырья, строительных материалов и накапливаться в воздухе помещений.

Радон имеет 4 природных изотопа – продуктов распада изотопов радия: ^{222}Rn – радон с периодом полураспада 3,82 сут; ^{220}Rn – торон, его период полураспада составляет 55,6 с; и ^{219}Rn – актинон, 3,96 с. В одну из побочных ветвей семейства урана-радия входит также очень короткоживущий ($T_{1/2}=35$ мс) ^{218}Rn . Наиболее долгоживущим из природных изотопов радона является ^{222}Rn , и потому именно его содержание в этих средах максимально. Радон дает примерно 50–55 % дозы облучения, которое ежегодно получает каждый житель Земли, торон прибавляет к этому еще ≈ 5 –10 %.

Распад радона-222 происходит с излучением альфа-частицы, которая представляет собой ядро атома гелия, фактически состоящего из двух протонов и двух нейтронов. Проникающая способность альфа-частиц довольно мала, однако они обладают наибольшей ионизирующей способностью, что представляет угрозу жизни и здоровью человека при непосредственном воздействии на внутренние ткани организма.

Проблема содержания радона в воздухе жилых помещений широко исследуется как на территории нашей страны, так и за рубежом. Опасность радона описана в многочисленных исследованиях [3,7,8,9]. Пребывая в помещении зданий, человек подвергается как внешнему, так и внутреннему облучению. Внешним облучением по сравнению с внутренним обычно пренебрегают. Внутреннее облучение, в свою очередь, обусловлено попаданием атомов радона в организм при дыхании, в процессе приема воды и пищи. Радон способен частично растворяться в мягких тканях, дочерние продукты его распада в виде аэрозолей могут осаждаться на слизистой, в бронхах и желудке. Поступая в организм человека тем или иным образом, радон способен вызывать многочисленные нарушения, основным последствием облучения при этом является увеличение онкологических заболеваний.

1.3 Регулирование в области радиационной безопасности

В настоящее время соблюдение основных норм радиационной безопасности законодательно закреплено положениями Федерального закона «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» №52-ФЗ от 30.03.99 и Федерального закона «О радиационной безопасности населения» №3-ФЗ от 09.01.96.

Согласно ст. 22 Федерального закона «О радиационной безопасности населения» «Граждане Российской Федерации, иностранные граждане и лица без гражданства, проживающие на территории Российской Федерации, имеют право на радиационную безопасность». Статья 15 указанного выше Феде-

рального закона также выступает гарантом защиты населения при обеспечении радиационной безопасности в условиях воздействия природных радионуклидов. Так, устанавливается ограничение для величины облучения, обусловленной радоном и дочерними продуктами его распада. С этой целью проектирование и строительство зданий и сооружений должно осуществляться с учетом требований по предотвращению поступления радона в воздух помещений. В случае невозможности обеспечить допустимые уровни содержания радона в зданиях и сооружениях, должен быть изменен характер их использования [10].

В системе Российского законодательства основным документом по ограничению облучения населения во всех условиях облучения от источников техногенного или природного происхождения являются Нормы радиационной безопасности.

Согласно [11] допустимое значение эффективной дозы, обусловленной суммарным воздействием природных источников излучения, для населения не устанавливается. Снижение облучения населения достигается путем установления системы ограничений на облучение населения от отдельных природных источников излучения.

Регулирование и нормирование в области радиационной безопасности населения осуществляется рядом нормативных правовых документов, основными из которых являются:

– **СП 2.6.1.2612-10** «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности, ОСПОРБ-99/2010» устанавливают требования по защите людей от вредного радиационного воздействия при всех условиях облучения от источников ионизирующего излучения, на которые распространяется действие НРБ-99 [12].

Требования, нормативы и правила, установленные НРБ-99 и ОСПОРБ-99, являются обязательными для всех юридических лиц, независимо от их подчиненности и формы собственности, в результате деятельности которых

возможно облучение людей, а также для администраций субъектов Российской Федерации, местных органов власти, граждан Российской Федерации, иностранных граждан и лиц без гражданства, проживающих на территории Российской Федерации.

– **СанПиН 2.6.1.2800-10** «Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения» устанавливают общие требования по обеспечению радиационной безопасности населения при воздействии природных источников ионизирующего излучения в производственных, коммунальных условиях и быту [13].

– **Свод правил СП 321.1325800.2017** «Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты» устанавливает правила проектирования противорадоновой защиты новых жилых и общественных зданий и может быть ограниченно использован при разработке мероприятий по нормализации радоновой обстановки в существующих зданиях при проведении их реконструкции, реставрации или капитального ремонта [14].

– **Свод правил СП 11-102-97** «Инженерно-экологические изыскания для строительства» устанавливает основные правила и рекомендуемые процедуры проведения инженерно-экологических изысканий для строительства [15].

– Методические указания «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности». **МУ 2.6.1.2398-08** [16].

– Методические указания «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности». **МУ 2.6.1.2838-11** [17].

МУ 2.6.1.2398-08 и МУ 2.6.1.2838-11 распространяются на организацию и порядок проведения радиационного контроля на соответствие санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям по показателям радиационной безопасности жилых домов, общественных и производственных зданий и сооружений.

– **ГОСТ 30108-94** «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов» устанавливает методы определения удельной эффективной активности естественных радионуклидов для оценки строительных материалов и изделий, а также порядок проведения контроля [18].

На территории субъектов Федерации могут быть приняты свои, местные территориальные строительные нормы (ТСН). Такие документы могут дублировать или, при соответствующем обосновании, ужесточить допустимые уровни ионизирующих излучений, критерии для принятия решений и требования, предъявляемые к проектированию, строительству, приемке зданий и отводу земельных участков под застройку.

Пункт 4.24 **СНиП 2.02.01-83*** (СП 22.13330.2016) предусматривает, что на участках, где по данным инженерно-экологических изысканий имеются выделения газов (радона, метана и др.), должны быть предусмотрены мероприятия по изоляции соприкасающихся с грунтом конструкций или способствующие снижению концентрации газов.

Приведенные выше правовые нормативные документы устанавливают ограничение к величине эффективной дозы облучения, эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА), значению удельной эффективной активности естественных радионуклидов (ЕРН) в составе минерального сырья и строительных материалов, плотности потока радона с поверхности грунта застраиваемой территории, однако, показатель процесса эманирования – коэффициент эманирования строительных материалов – в настоящее время не нормируется. Необходимо отметить, что при расчете процессов теплопе-

редачи аналогичный показатель – коэффициент теплопроводности – стандартизирован с учетом влажностного режима помещений зданий в соответствии с установленными условиями эксплуатации ограждающих конструкций.

1.4 Формирование естественного радиационного фона в помещениях зданий

Радон, генерируемый горными породами в процессе распада урана и последующих радиоактивных превращений элементов, содержится в грунтах под зданием, водопродонной воде, строительных материалах, а также высвобождается при сжигании топлива, главным образом, бурых углей. При этом, наибольший вклад в радиационный фон помещений вносят непосредственно эксхалация радона из грунтов под зданием и эманирование радона из строительных материалов.

При этом ограждающие конструкции здания существенно затрудняют проникновение почвенного радона в помещения, а эксхалация радона из междуэтажных перекрытий и из стен обуславливает накопление радона и его дочерних продуктов распада в воздухе помещений.

1.4.1 Концентрация радона в воздухе помещений

Как уже было отмечено, радон – тяжелый газ, в 7,5 раз тяжелее воздуха, что приводит к повышенным значениям концентрации радона в подвальных помещениях и на нижних этажах зданий. Поступая внутрь помещения тем или иным образом, радон способен накапливаться в нем. В результате в воздухе могут образовываться довольно высокие уровни радиации. При этом герметизация помещений с целью утепления затрудняет естественную вентиляцию радона [4].

Основными факторами, определяющими объемную активность радона в воздухе помещения, являются скорость эксхалации радона и кратность воз-

духообмена. При пониженном воздухообмене и повышенной скорости эксхалляции концентрации радона в помещениях могут достигать весьма высоких значений.

Таблица 1.3 – Источники радона в помещениях зданий [4]

Источник радона	Поступление, кБк/сут
Строительные материалы и грунты под зданием	60
Наружный воздух	10
Вода	4
Природный газ	3

С целью снижения природного облучения устанавливают ограничение для величины среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности радона и торона, а также продуктов их распада в воздухе помещений вновь строящихся жилых и общественных зданий $\text{ЭРОА}_{\text{Rn}+} 4,6 \cdot \text{ЭРОА}_{\text{Tn}}$ на уровне 100 Бк/м^3 . Для эксплуатируемых зданий эта величина не должна превышать 200 Бк/м^3 [11].

Объемные активности радона в воздухе помещений распределяются крайне неравномерно и варьируются в широких пределах. Величина концентрации радона зависит от многих факторов: содержания естественных радионуклидов в грунтах и в составе строительных материалов ограждающих конструкций, эффективности систем принудительной и естественной вентиляции, конструктивных особенностей, этажности здания [19,20,21].

Наибольшие значения концентраций радона в подвальных помещениях связаны с эксхалляцией радона из грунта под зданием. На нижних этажах здания также наблюдаются повышенные значения концентрации радона, поступающего, в свою очередь, из подвальных помещений. Проведенные исследования показывают, что по мере увеличения этажности здания величина концентрации радона в помещениях резко снижается, однако, на последних этажах здания его значение снова возрастает, что связано с неудовлетворительной работой систем вентиляции.

Экссхалиция радона из почвенного слоя внутрь зданий обусловлена его переносом через трещины и полости в ограждающих конструкциях. Другими способами миграции радона в воздух помещений являются швы в перекрытиях и места ввода инженерных сетей. На интенсивность выделения радона из почв и грунтов влияют строение почвы, ее влажность, температура, атмосферное давление. Структура земной коры определяет миграционную способность атомов радона. С увеличением влажности грунтов миграция радона увеличивается; повышение температуры также приводит к увеличению потока радона с поверхности почв. В свою очередь, повышение атмосферного давления препятствует выходу радона на поверхность, что приводит к снижению концентрации радона в приповерхностном слое [22].

1.4.2 Содержание естественных радионуклидов в составе минерального сырья и строительных материалах

Основными радионуклидами, содержащимися в горных породах, являются радий, торий и калий. Присутствие ЕРН в составе минерального сырья обуславливает радиоактивность готовых строительных материалов. По этой причине анализ радиоактивности отдельных видов стройматериалов целесообразно проводить в сопоставлении с данными о радиоактивности горных пород, почвы и земной коры.

Показателем радиационного качества минерального сырья, а также готовых строительных материалов, является эффективная удельная активность природных радионуклидов. Согласно действующим нормативным документам [11, 18] эта величина нормируется и не должна превышать установленных значений с учетом возможности применения строительных материалов, отходов промышленности, применяемых при изготовлении строительных материалов и готовых изделий, для определенных нужд строительства (Таблица 1.1).

Таблица 1.4 - Радиационно-гигиеническая оценка и требования к материалам согласно НРБ-99/2009 при их производстве

Класс материала		Аэфф, Бк/кг
1	Для материалов, используемых в строящихся и реконструируемых жилых и общественных зданиях	370
2	Для материалов, используемых в дорожном строительстве в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных сооружений	740
3	Для материалов, используемых в дорожном строительстве вне населенных пунктов	1500
4	Вопрос об использовании материалов решается в каждом случае отдельно на основании санитарно-эпидемиологического заключения федерального органа исполнительной власти, уполномоченного осуществлять государственный санитарно-эпидемиологический надзор	1500-4000
	Материалы не должны использоваться в строительстве	свыше 4000

Эффективная удельная активность радионуклидов в строительных материалах зависит от вида строительного материала и места производства минерального сырья. В литературе отмечается, что наиболее высокие удельные активности ЕРН характерны для горных пород вулканического происхождения (гранит, туф, пемза), а наиболее низкие – для пород осадочного происхождения - карбонатных (мрамор, известняк) и сульфатных горных пород (гипс, ангидрит). Песок и гравий имеют удельную активность, близкую к средней для почв или земной коры. При этом для бетонов характерен широкий диапазон изменчивости содержания естественных радионуклидов [23].

Удельная активность естественных радионуклидов зависит не только от вида производимых строительных материалов, но и от места добычи сырья, из которых производился строительный материал. Это подтверждает не-

обходимость выявления территорий, богатых урановыми рудами, а также разработки карт радоноопасных территорий [24,25,26,27].

Для производства строительных материалов могут применяться отходы промышленного производства. Такая практика предотвращает истощение природных ресурсов, загрязнение окружающей среды, сокращает расходы на производство стройматериалов, а также способствует улучшению свойств и характеристик строительного материала. Однако такие промышленные отходы как фосфогипс, являющийся побочным продуктом при производстве фосфорной кислоты, доменные шлаки, золы и шламы часто имеют повышенные значения удельной активности естественных радионуклидов.

Исследованию удельной эффективной активности в строительных материалах посвящены работы [28,29,30,31]. Измерения удельной эффективной активности проводились как для минерального сырья – извести, гипса, щебня, песков, цементов, для отходов промышленности – золы, шлаков, трепел, так и для готовых строительных материалов – бетонов и кирпичей с различными заполнителями. По результатам статистической обработки измерений выявлено, что для строительного сырья и материалов характерен большой диапазон изменчивости удельной активности и удельной эффективной активности естественных радионуклидов. Это свидетельствует о возможности управления радиационным качеством строительной продукции путём исключения или сокращения доли высокорadioактивного сырья в строительных материалах и изделиях [31].

В работе [32] исследовалась возможность прогнозирования удельной эффективной активности и многокомпонентного строительного материала – тяжелого бетона. Было установлено, что нормируемая величина удельной эффективной активности в строительных смесях может быть легко рассчитана по известным значениям $A_{эфф}$ сырьевых материалов с учётом их массовых вкладов и особенностей технологий производства.

Авторами [33] проводилось изучение влияния тепловой обработки карбонатных горных пород на удельную эффективную активность ЕРН при про-

изводстве строительных материалов. Было выявлено, что для исследуемого сырья – мел и известняк – с увеличением температуры обжига удельная эффективная активность ЕРН уменьшается.

1.4.3 Исследования в области эманирования горных пород и строительных материалов

Под эманированием понимают процесс выделения радиоактивных газов, или эманаций, радона, торона, актинона из веществ. Радиоактивные эманации радон и торон способны выделяться из ограждающих конструкций и накапливаться в воздухе помещений. Из-за малого периода полураспада, торон вносит незначительный вклад в суммарную дозовую нагрузку, т.к. только небольшая доля торона может выделиться в воздух помещения из строительных материалов и грунта под зданием.

Эманирование включает процессы вылета атомов радона из твердой фазы вещества за счет эффекта отдачи при распаде радия, диффузию радона в порах материала, адсорбцию на стенках трещин и капилляров вещества.

Эманирование за счет эффекта отдачи практически не зависит от внешних условий окружающей среды. При радиоактивном распаде радия образуется энергия, благодаря которой атом радона приобретает импульс и смещается на расстояние, равное пробегу атома отдачи в среде. За счет эффекта отдачи в среду, окружающую образец, выделяются атомы эманации, образовавшиеся в приповерхностном слое толщиной меньшей пробега атомов отдачи [2].

Атомы радона, выделившиеся из зерен вещества, попадают в поровое пространство материала. Радон способен диффундировать в объеме пор, при этом доля атомов распадается непосредственно в теле материала, другая часть эманирует из строительной конструкции в воздух помещения, где и распадается.

Эманирование зависит от минерального состава, однородности распределения радия-226 в объеме материала; размеров, количества и типа пор; удельной поверхности и гранулометрического состава исследуемой пробы.

Диффузионная составляющая эманирования зависит от внутренней структуры материала и внешних условий окружающей среды, таких как температура, влажность, атмосферное давление и подвижность воздуха вблизи анализируемого вещества [9].

Для описания процесса эманирования используют эффективный параметр – коэффициент эманирования. Коэффициентом эманирования по радону (КЭР) называют отношение количества свободного радона, выделяемого единицей массы вещества в естественных условиях (эманирующей способности) к количеству эманации, равновесному с изотопом радия ^{226}Ra , содержащимся в веществе.

В ряде работ [34,35,36] коэффициент эманирования исследовался для горных пород и почв. Метод определения показателя выбирают в соответствии с целью и задачами исследования, т.е. коэффициент эманирования должен учитывать не только сам процесс эманирования, но также и условия окружающей среды. Отмечается, что значения КЭР для грунтов определяются их свойствами, преимущественно, открытой пористостью. Свойства в пределах каждого инженерно-геологического элемента изменяются незначительно, в свою очередь, коэффициент эманирования для таких грунтов имеет сравнительно невысокую вариативность.

В настоящее время определению коэффициентов эманирования строительных материалов посвящены отдельные немногочисленные исследования. При этом выявление и оценка радоновыделения для различных групп строительных материалов имеет высокую практическую значимость.

Экспериментально коэффициенты эманирования радона для кирпича, красной и белой глины, фасадной плитки, образца шлака в смеси с цементом и песком были получены в исследовании [37]. В работе [38] получены значения коэффициента эманирования для 24 видов строительного сырья и мате-

риалов, в том числе для отходов промышленного производства. При этом отмечается, что наибольшие значения коэффициента эманирования получены для песка, гравия, гидратированного цемента, цементных бетонов и растворов; наименьшие показатели имеют материалы, подвергшиеся обжигу: керамический кирпич, плитки, керамзит, негидратированный цемент. Высокотемпературная обработка приводит к снижению коэффициента эманирования за счет выделения радона и радия в окружающую среду; при этом повышение температуры обжига приводит к большему снижению коэффициента эманирования [39]. В [23] наблюдаемый эффект объясняется изменением микроструктуры – спеканием микрочастиц и образованием замкнутых пор, препятствующих свободному выходу радона.

Одним из основных внешних факторов, способных существенно влиять на количество выделившегося радона в нормальных условиях, является влажность. Этот факт подтверждают исследования в области эманирования горных пород и почв.

Основные теории о влиянии влажности на процесс эманирования горных пород представлены в работе [40]. Согласно исследований, проведенных авторами [41,42], было выявлено незначительное влияние влажности на выделение радона из грунтов и горных пород. Необходимо отметить, что исследование коэффициента эманирования в [42] проводилось при влажности грунтов: для песков – 3-5%, суглинков – 12-14%, глин – 23-34%. В [43,44,45] представлена устойчивая зависимость между влажностью образцов и коэффициентом эманирования. Проведенные исследования показали, что при увеличении влагосодержания для большинства исследуемых образцов значение коэффициента эманирования возрастало. При достижении степени заполнения пор водой, близкой к полному водонасыщению, у одних образцов наблюдалась тенденция к уменьшению эманирования, а другие оставались пассивными к внешнему воздействию влаги.

На основе существующих и проведенных в лабораторных условиях исследований авторы [46] делают вывод о существовании горных пород с раз-

личным эманационным откликом на изменение влажности, что обуславливает расхождение существующих данных. Так, авторы классифицируют горные породы по степени эманационного отклика на «нейтрально-влажностно эманлирующие», «влажностно-эманлирующие» и «экстремально-влажностно эманлирующие».

Увеличение эманирования радона при увеличении влажности материала также получено расчетным путем с использованием modified Monte Carlo TRIM program [47]. При этом распределение влаги в пористой среде обсуждается на уровне теории капилляров. Отмечается, что в диапазоне влажности от 10% до 30% эманирование материала быстро достигает величины эманирования в насыщенном состоянии. При достижении 30%, на поверхности пор образуется тонкая пленка, препятствующая внедрению атома отдачи радона в другую часть стенки поры.

В работе [48] были получены коэффициенты эманирования для гранитов, используемых в строительстве, в сухом, естественном и влажном состоянии, рассчитана скорость эманирования, а также альфа-эквивалентная доза. По результатам проведенных испытаний было показано, что даже при незначительном увеличении влагосодержания коэффициент эманирования существенно возрастал. Зависимость эманирования бетона от влагосодержания была получена в работе [49]. При этом содержание радия в образцах повышалось двумя разными способами. Первый способ заключался в добавлении бромида радия. Во втором способе количество радия в бетоне увеличивали за счет обогащения урановой рудой. Авторы наблюдали сильную зависимость доли излучения от метода обогащения. Для образца, обогащенного урановой рудой, эманирование по радону было примерно в десять раз меньше.

Таким образом, влиянию влажности на эманирование материалов посвящены работы, связанные, преимущественно с изучением горных пород и почв. При этом, практически не изучено влияние влажности на коэффициент эманирования радона многокомпонентных строительных материалов, состав

и структура которых значительно отличаются от состава и структуры горных пород и грунтов.

1.4.4 Влажностный режим помещений

Под воздействием температур, влажности внутреннего и наружного воздуха, скорости движения воздуха, в помещениях зданий формируется определенный микроклимат, непосредственно влияющий на температурно-влажностный режим ограждающих конструкций. В зависимости от показаний температуры и относительной влажности воздуха помещения подразделяют на сухие, с нормальной влажностью, влажные и мокрые (Таблица 1.5).

Таблица 1.5 - Влажностный режим помещений зданий [50].

Режим	Влажность внутреннего воздуха, %, при температуре, °С		
	до 12	св. 12 до 24	св. 24
Сухой	до 60	до 50	до 40
нормальный	свыше 60 до 75	свыше 50 до 60	свыше 40 до 50
влажный	свыше 75	свыше 60 до 75	свыше 50 до 60
мокрый	-	свыше 75	свыше 60

При этом [51] устанавливает оптимальные и допустимые значения относительной влажности воздуха для различных наименованиях помещений жилых зданий и общежитий, детских дошкольных учреждений, общественных и административных зданий. Кроме того, показатели микроклимата в помещениях подразделяются по периоду года на холодный и теплый. Для холодного периода года оптимальные значения относительной влажности преимущественно составляют 30-45%, допустимые – 60%. Для теплого периода года значения составляют соответственно 60-30% и 65%. Для отдель-

ных наименований и категорий помещений значения оптимальной и допустимой влажности не нормируются.

Помимо воздушной среды увлажнение конструкций может происходить за счет строительной влаги, попадающей в материалы в период возведения здания, атмосферной влаги, а также грунтовой влаги, проникающей в ограждения из грунта вследствие капиллярного всасывания при недостаточной гидроизоляции.

Строительные материалы за счет своих гигроскопических свойств способны сорбировать влагу из воздуха, а при определенных условиях, за счет конденсации водяных паров, в толще и на поверхности строительных материалов ограждающих конструкций может скапливаться конденсационная влага [52].

Так, влажностный режим помещений зависит от функционального назначения помещения, климатических факторов, зоны влажности, в которой расположен объект строительства, и может существенно изменяться в зависимости от распределения температур в толще конструкции, режима работы систем отопления и вентиляции, а также погодных условий.

Выводы по первой главе

1. Анализ правовой нормативной документации показал, что в настоящее время предъявляются требования к ряду параметров, формирующих радиационный фон в помещениях зданий: значению плотности потока радона с поверхности грунта застраиваемой территории, качеству минерального сырья, строительных материалов и готовых строительных изделий; содержанию радона в воздухе жилых эксплуатируемых и вновь строящихся зданий, однако, параметры процесса эманирования, непосредственно влияющие на концентрации радона в воздухе помещений, при этом, не нормируются.
2. Концентрации радона в помещениях зданий неравномерны и зависят от содержания естественных радионуклидов в грунтах и в составе строительных

материалов, конструктивных особенностей и этажности здания, а также величины воздухообмена в помещениях.

3. Эманирование строительных материалов является сложным процессом, зависящим от минерального состава, структуры материала, однородности распределения радия в составе минерального сырья, а также внешних условий окружающей среды, основным из которых является влажность.

3. Обзор отечественных и зарубежных исследований показал, что работы, посвященные вопросу эманирования строительных материалов крайне немногочисленны, при этом, практически не изучено влияние влажности на процесс эманирования строительных материалов.

4. Относительная влажность воздуха является нормируемым параметром микроклимата помещений, который зависит от его функционального назначения, климатических факторов, зоны влажности, в которой расположен объект строительства и может существенно изменяться в зависимости от распределения температур в толще конструкции, режима работы систем отопления и вентиляции, а также погодных условий.

Таким образом, исследование процесса эманирования строительных материалов в условиях изменения относительной влажности воздуха, которая, в свою очередь, определяет сорбционную влажность материала, имеет высокую практическую значимость и требует дальнейшего изучения с целью обеспечения радиационной безопасности населения.

ГЛАВА 2. Методология исследования, оборудование и характеристика материалов

Для изучения механизма эманирования радона из строительных материалов в процессе исследования проводили измерение следующих параметров: удельной активности естественных радионуклидов и объемной активности радона в воздухе. На основании полученных данных определялись коэффициенты эманирования в зависимости от относительной влажности воздуха, и, как следствие, сорбционной влажности образца. Для решения этих задач применялись следующие методы инструментальных измерений:

– гамма-спектрометрический метод анализа, который основан на измерении интенсивностей пиков полного поглощения, принадлежащих гамма-линиям определяемых радионуклидов. Каждый из них испускает гамма-кванты строго определенной энергии. По наличию в измеренных спектрах пиков, соответствующих этим энергиям, судят о присутствии в пробах тех или иных радионуклидов, а по интенсивностям (площадям) пиков – об их содержаниях;

– эманационный метод, который основан на непосредственном измерении объемной активности радона в воздухе герметичной емкости в режимах пассивного отбора проб воздуха и прокачки его через ионизационную камеру.

2.1 Определение удельной активности естественных радионуклидов гамма-спектрометрическим методом

Определение удельной активности естественных радионуклидов проводилось с помощью стационарного гамма-бета-спектрометра МКС-АТ1315 фирмы АТОМТЕХ в соответствии с методиками [53]. Пакет программ «Прогресс» предназначен для анализа спектрограмм стандартного радионуклидного состава: ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{226}Ra в равновесии с дочерними продуктами.

Гамма-спектрометр представляет собой стационарную установку со сцинтилляционным блоком детектирования, ПЭВМ с программным обеспечением «ПРОГРЕСС» и состоит из сцинтилляционного блока детектирования на основе кристалла йодистого натрия $NaI(Tl)$ различных размеров, блок питания и усиления импульсов, плату аналого-цифрового преобразователя (АЦП), свинцовый экран для защиты блока детектирования от фонового излучения. Как правило, блоки питания и усиления импульсов, а также АЦП конструктивно расположены в самом блоке детектирования.

Принцип действия гамма-спектрометра заключается в получении аппаратного спектра импульсов от детектора, регистрирующего излучение счетного образца, экспонируемого в фиксированных условиях измерения. Активность радионуклида в исследуемой пробе определяется путем обработки полученной спектрограммы на ЭВМ с помощью специального пакета программ «ПРОГРЕСС». Пакет «ПРОГРЕСС» позволяет управлять работой гамма-спектрометра, анализировать спектрограмму и идентифицировать радионуклиды, определять активность соответствующих нуклонов в пробе, рассчитывать неопределенность измерения активности и протоколировать результаты измерений.

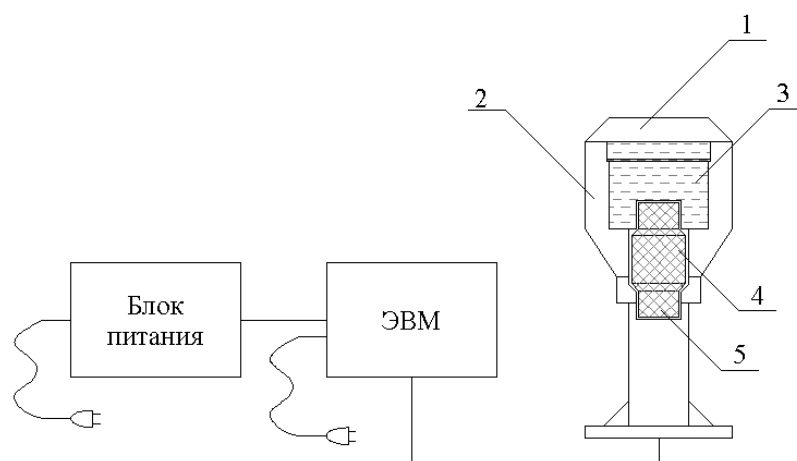


Рисунок 2.1 - Принципиальная схема гамма-спектрометра:

- 1 – Створка откатная; 2 – свинцовый корпус; 3 – сосуд Маринелли;
- 4 – блок детектирования; 5 – фотоэлектронный умножитель

По результатам измерения образцов выполняется расчет и построение градуировочных кривых эффективности регистрации, а также вычисляются поправочные коэффициенты, необходимые для корректного учета самопоглощающего излучения (особенно низких энергий) в измеряемых пробах с различной насыпной плотностью.

Для определения содержания основных естественных радионуклидов в лабораторию поступают отобранные пробы массой не менее 1 кг. Отобранную пробу высушивают, после чего материал при помощи дробилки измельчают до размера фракций не более 0,5-1 мм. После этого исследуемый образец помещался в стандартную измерительную кювету и герметизировался. Объем заполнения кюветы должен соответствовать номинальному значению с погрешностью не более $\pm 10\%$. Масса пробы определяется взвешиванием с погрешностью не более $\pm 2\%$. Для установления радиоактивного равновесия между радоном и его ДПР в таком состоянии проба выдерживалась на протяжении 14 дней. Измерение содержания основных радионуклидов на гамма-спектрометре производилось 3 раза с экспозицией 180 минут.

Удельная эффективная активность естественных радионуклидов определялась согласно [11]:

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3 \cdot A_{Th} + 0,09 \cdot A_K \quad (2.1)$$

2.2 Измерение объемной активности радона на многопараметрическом радоновом монитор-дозиметре «AlphaGUARD PQ2000»

Для измерения объемной активности радона в воздухе в режимах пассивного отбора проб воздуха и прокачки анализируемого воздуха через ионизационную камеру в исследовании применялся радиометр AlphaGUARD Mod.2000. Основная область применения радиометра - это исследования в области радиоактивности строительных материалов и сырья, точнее, измере-

ние коэффициентов эманирования радона-222 из сыпучих и твердых образцов строительного сырья и готовых строительных материалов [54].

Радон-монитор AlphaGUARD PQ2000 является центральным блоком портативной компактной измерительной системы для определения объемной активности радона и его ДПП, мощности дозы гамма-излучения, а также ряда климатических параметров.

Схема установки представлена на Рисунке 2.2.

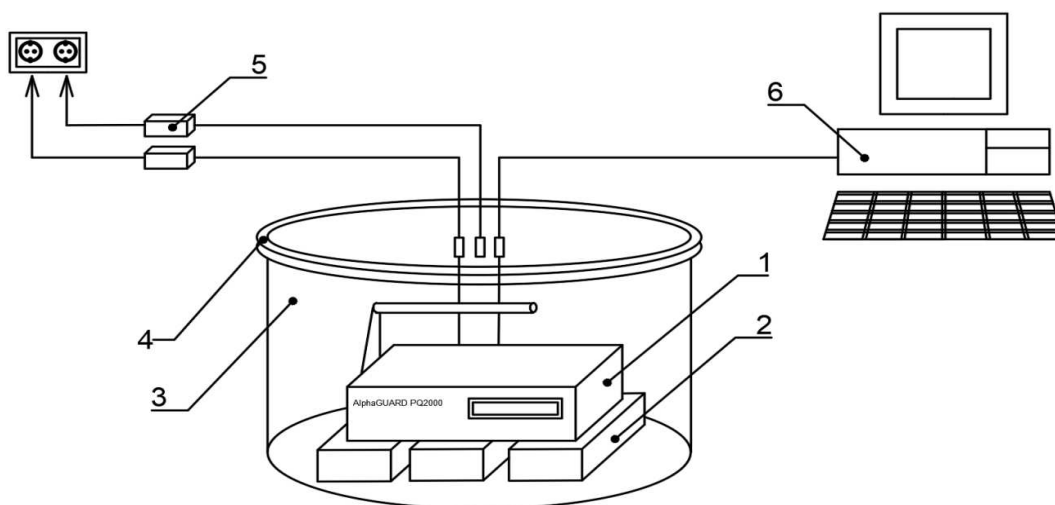


Рисунок 2.2 – Схема подключения радон-монитора AlphaGUARD PQ2000:
1 – радон-монитор AlphaGUARD с блоком питания; 2 – исследуемые образцы; 3 – стальной герметичный эманационный контейнер; 4 – стальное кольцо-затвор; 5 – блок питания вентилятора;
6 – персональный компьютер.

Измерение объемной активности радона проводилось на образцах тяжелого бетона различной сорбционной влажности. Предварительно определялась масса и объем исследуемого образца. После чего образец помещался в герметичную емкость объемом $0,05 \text{ м}^3$, куда устанавливался включенный радон-монитор. Прибор подключали к разъемам крышки контейнера, которая закрывалась и фиксировалась с помощью разъемного механизма.

Измерения объемной активности регистрировались в автоматическом режиме на протяжении 14 дней с интервалом в 1 ч. Одновременно с концен-

трацией радона в воздухе камеры радиометром фиксировалась температура, относительная влажность воздуха и барометрическое давление. Информация о концентрации радона в контейнере считывалась при помощи персонального компьютера и программного обеспечения AlphaEXPERT. По окончании срока экспозиции также определялась масса образца.

Изменение концентрации радона в воздухе герметичной емкости может быть описано формулой

$$\frac{dC}{dt} = \frac{E}{V} - \lambda \cdot C \quad (2.2)$$

где E – скорость эманирования радона из образца, $Бк/с$;

V – объем контейнера, $м^3$;

λ – постоянная распада радона, $0,00755 \text{ ч}^{-1}$;

t – время экспозиции, $ч$.

Решение уравнения (2.2) имеет вид:

$$C(t) = \frac{E}{\lambda \cdot V} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}) + C_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.3)$$

где C_0 – начальная концентрация радона.

Формулу 2.3 можно представить в виде:

$$C(t) = C_{max} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}) + C_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad (2.4)$$

где C_{max} – максимальная концентрация радона в воздухе емкости, $Бк/м^3$.

Коэффициент эманирования в ходе эксперимента определяли по формуле

$$E(t) = \frac{C(t) \cdot V}{(1 - e^{-\lambda \cdot t}) \cdot M \cdot C_{Ra}}, \quad (2.5)$$

где $C(t)$ – текущая концентрация радона, $Bк/м^3$;

V – свободный объем внутри емкости, $м^3$;

t – время экспозиции, $ч$;

M – масса пробы, $кг$;

C_{Ra} – удельная активность радия, $Bк/кг$.

Коэффициент эманирования рассчитывался по формуле [25]

$$E = \frac{C_{Rn} \cdot V}{C_{Ra} \cdot M}, \quad (2.6)$$

где C_{Rn} – равновесная концентрация, $Bк/м^3$, в герметичной емкости.

По окончании эксперимента определялась сорбционная влажность образцов:

$$W_s = \frac{m_s - m_d}{m_d}, \quad (2.7)$$

В этой формуле m_d и m_s – масса образцов в сухом и в равновесном состоянии с максимальной влажностью воздуха, достигнутой в процессе эксперимента. Величину открытой пористости W_f определяли методом последовательного увлажнения, путем погружения в воду сначала на 1/3, затем на 2/3 высоты образца. На последнем, третьем этапе, уровень воды превышал верхний уровень поверхности образцов на 50 мм. Длительность последнего этапа определялась временем, при котором результаты двух последовательных взвешиваний отличались не более чем на 0,1%.

2.3 Расчет скорости поступления радона и формирование концентрации радона в воздухе помещений

Процесс эксхалиции радона можно условно разделить на два этапа, эманирование за счет агрегатной отдачи при альфа-распаде радия и диффузия радона в порах материала с последующим выходом в воздух помещения. Процесс распространения радона по порам материала описывается уравнениями диффузии.

Одномерное уравнение диффузии радона в пористой среде записывается в виде [23]:

$$\frac{\partial C_0}{\partial t} = \lambda_0 \cdot C_{\text{макс}} - \lambda_0 \cdot C_0 + \frac{D}{p} \cdot \frac{\partial^2 C_0}{\partial x^2}, \quad (2.8)$$

где $C_{\text{макс}} = \frac{C_{Ra} \cdot E \cdot \rho}{p}$ – максимально возможная концентрация радона в воздухе, находящегося в порах материала, Бк/м³;

p – пористость материала;

ρ – плотность материала, кг/м³;

C_{Ra} – удельная активность радия в материале, Бк/кг;

λ_0 – постоянная распада радона, с⁻¹;

D – коэффициент диффузии, м²/с.

Скорость выделения радона в поровое пространство:

$$Q = \frac{C_{Ra} \cdot E \cdot \rho \cdot \lambda_0}{p} \quad (2.9)$$

Коэффициент диффузии является одним из параметров, определяющих скорость выхода радона из стеновых ограждений, и, как следствие – объемную активность радона в помещении. Величина коэффициента диффузии оп-

ределяется экспериментально, но также может быть получена из следующего соотношения:

$$L_c = \sqrt{\frac{D}{\lambda_0}}, \quad (2.10)$$

где L_c – длина диффузии радона, m .

Концентрации радона в воздухе помещений существенно зависят от интенсивности выхода радона с поверхности строительных материалов.

$$q = \frac{V \cdot C_{max} \cdot \lambda_0}{S} \quad (2.11)$$

где V – объем помещения, m^3 ;

C_{max} – максимальное значение объемной активности радона, $Bк/м^3$.

Скорость поступления радона через ограждающие конструкции за счет диффузии определялась по формуле

$$a_D = S \cdot q, \quad (2.12)$$

где S – площадь эманлирующей поверхности конструкций, m^2 .

Концентрация радона в воздухе зданий существенно зависит от кратности воздухообмена. В свою очередь, кратность воздухообмена в помещениях изменяется в зависимости от их функционального назначения, от конструкции помещений, погодных и климатических условий.

Величина равновесной объемной активности в воздухе помещений определяется выражением:

$$C_0 = \frac{\sum q_i \cdot S_i}{V \cdot (\lambda_0 + \lambda_v)} + \frac{\lambda_v}{\lambda_0 + \lambda_v} \cdot C_{атм}, \quad (2.13)$$

где λ_v – кратность воздухообмена в помещении;

$C_{атм}$ – концентрация радона в атмосферном воздухе, $Бк/м^3$.

По причине того, что $\lambda_v \gg \lambda_0$, уравнение 2.13 можно представить в виде:

$$C_0 = \frac{\sum q_i \cdot S_i}{V \cdot \lambda_v} + C_{атм}. \quad (2.14)$$

ГЛАВА 3. Результаты экспериментального исследования и оценка полученных данных

По результатам проведенных экспериментов были получены спектрограммы удельной и эффективной активности предварительно измельченного образца тяжелого бетона. Характерные их значения представлены на Рисунке 3.1.

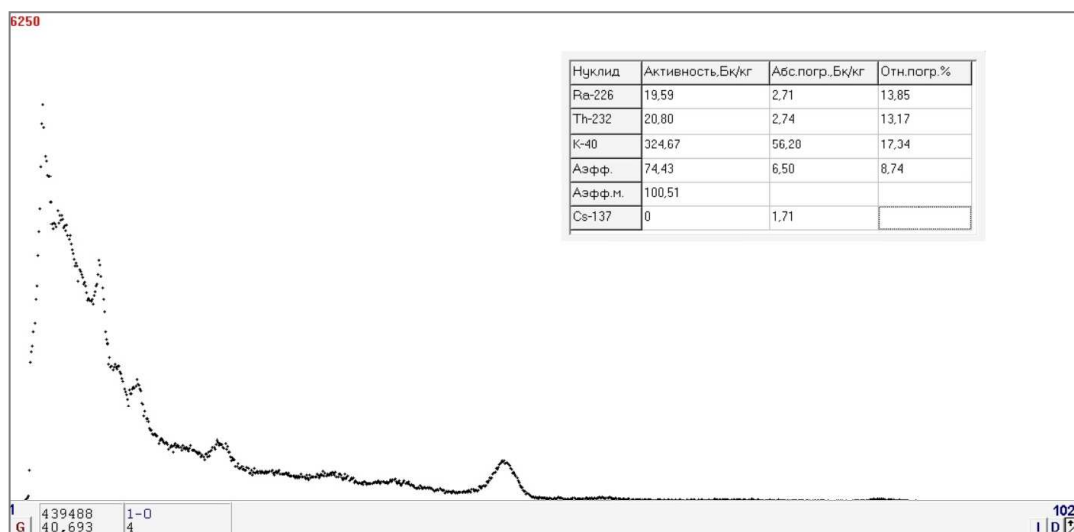


Рисунок 3.1 – Спектрограмма удельной и эффективной активности измельченного образца тяжелого бетона

По результатам гамма-спектрометрического анализа (Таблица 3.1) были получены средние удельные активности радионуклидов радия, тория и калия, рассчитана удельная эффективная активность по уравнению (2.1).

Таблица 3.1 – Результаты гамма-спектрометрического анализа

²²⁶ Ra, Бк/кг	²³² Th, Бк/кг	⁴⁰ K, Бк/кг	A _{эфф} , Бк/кг
19,1±0,92	20,8±0,03	338±15,5	76,6±1,67

Расчетная величина удельной эффективной активности не превысила предельно допустимое значение для материалов, используемых при строительстве и реконструкции жилых и общественных зданий, установленное на уровне 370 Бк/кг.

На рисунке 3.2 представлена характерная для принятых в эксперименте значений влажности образцов кинетика накопления радона в герметичной ёмкости и качество аппроксимации этого процесса уравнением (2.4). При этом значение коэффициента детерминации R^2 возрастало с увеличением влажности образцов от 0,924...0,979, т. е. качество аппроксимации увеличивалось.

Характерная кривая накопления радона в воздухе камеры представлена на рисунке 3.2.

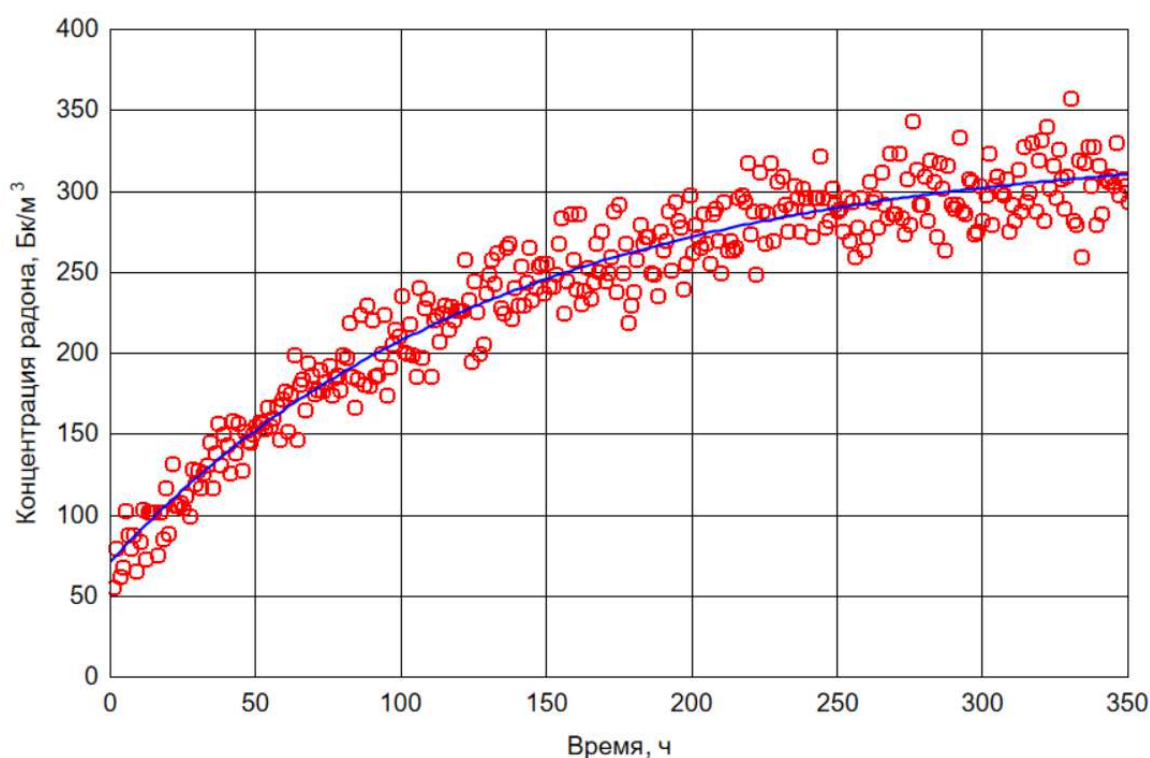


Рисунок 3.2 - Значения концентрации радона в герметичной емкости и расчет по уравнению (2.4)

При помощи программного комплекса STATISTICA методом наименьших квадратов были получены значения параметров уравнения (2.4) при значении $\lambda = 0,00755 \text{ ч}^{-1}$.

Таблица 3.2 – Статистическая оценка параметров C_{\max} , C_0

Параметр оценки		Стандартная ошибка, %	Границы значений пределов при 95% вероятности	
Обозначение	Значение, $Bк/м^3$		Нижний, $Bк/м^3$	Верхний, $Bк/м^3$
C_{\max}	329	1,47	326	331
C_0	71,6	2,42	66,9	76,4

На рисунке 3.3 представлен результат расчета коэффициента эманирования по уравнению (2.5).

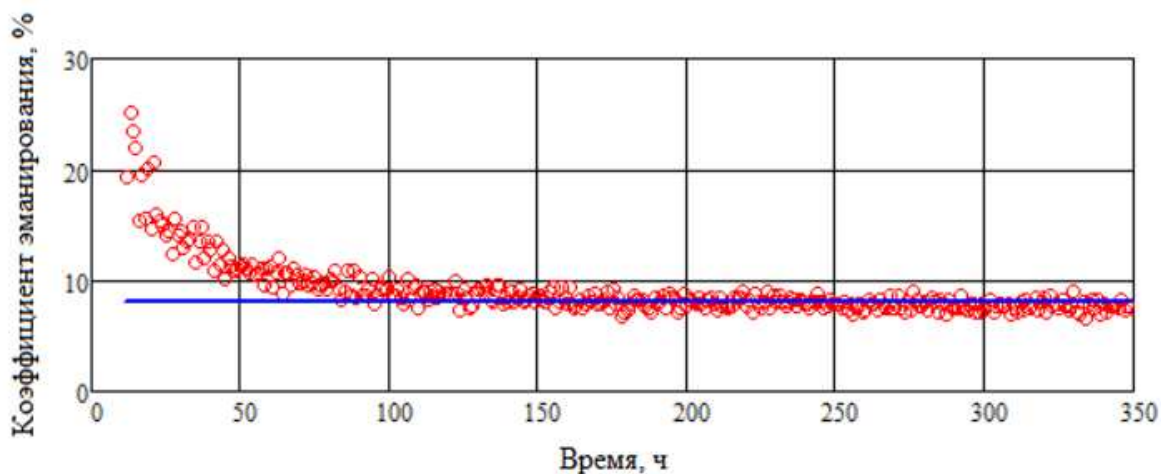


Рисунок 3.3 - Расчет коэффициента эманирования по уравнению (2.5)

Время экспозиции составило 330 часов. Хорошо видно, что уже через 200...250 часов отношение, рассчитанное по уравнению (2.5) становится постоянным, т.е. наблюдается равновесие между активностью радона в воздухе герметичной ёмкости и активностью радона, находящегося в исследуемых образцах.

Значение коэффициента эманирования было получено соответственно для серии экспериментов с различным влагосодержанием исследуемого образца (Таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Расчетные и экспериментальные данные процесса эманирования

	Температура, T, °C	Относительная равновесная влажность воздуха, φ , %	Влажность по объему, W_v , %	Максимальная концентрация радона в воздухе камеры, C_{max} , Бк/м ³	Коэффициент эманирования, E, %
1	32	15,0	0,031	189	5,20
2	31	41,0	1,59	329	8,00
3	30	72,0	2,41	381	9,00
4	29	93,5	6,65	432	10,2

Из представленных на рисунке 3.4 данных видно, что при увеличении относительной влажности воздуха RH коэффициент эманирования возрастает почти в 2 раза, однако, в отличие от величины сорбционной влажности, возрастающей с увеличением RH, скорость увеличения эманирования снижается.

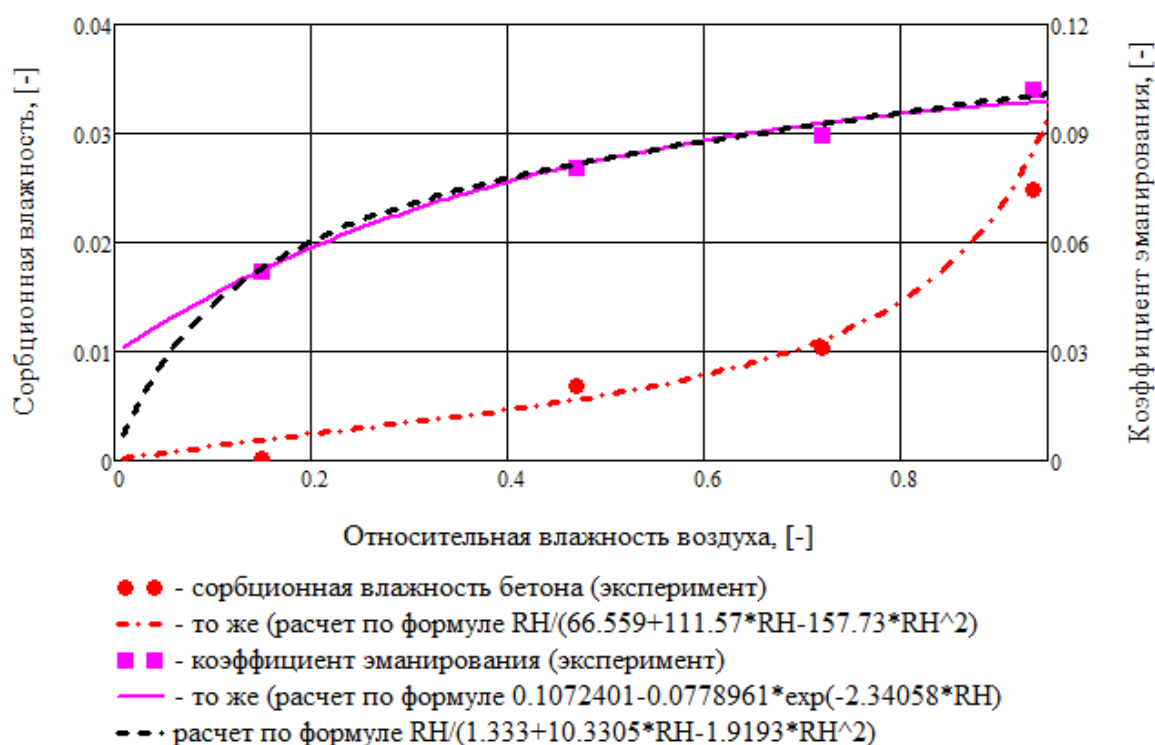


Рисунок 3.4 – Изменение коэффициента эманирования тяжелого бетона и его сорбционной влажности в стадии десорбции

от относительной влажности воздуха

Анализ кривых позволяет сделать вывод о существовании плотной корреляционной связи между процессами сорбции – десорбции водяных паров исследуемыми образцами из тяжелого бетона полусухого прессования и коэффициентом эманирования.

Выводы по третьей главе

1. Экспериментально установлено, что процесс эманирования многокомпонентного строительного материала – тяжелого бетона – определяется процессами сорбции-десорбции водяных паров, и в интервале исследуемых значений влажности возрастает почти в 2 раза.
2. Получено уравнение, описывающее зависимость относительной влажности воздуха, определяющей сорбционную влажность материала, и коэффициентом эманирования.

ГЛАВА 4. Моделирование процессов переноса радона системы грунт-атмосфера-здание с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics

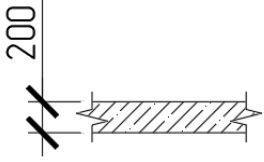
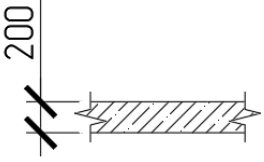
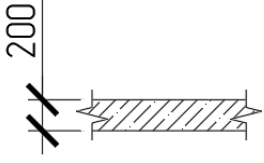
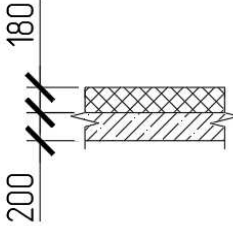
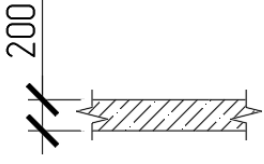
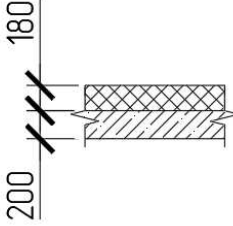
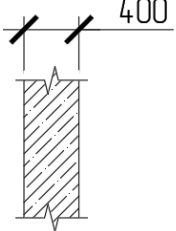
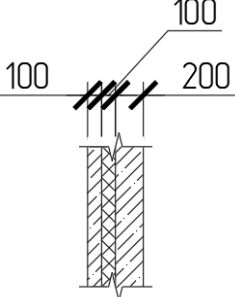
Несмотря на то, что в настоящее время применяются различные технические решения по обеспечению радиационной безопасности внутри зданий, единственным критерием, позволяющим произвести оценку уровня ионизирующего излучения, является непосредственное измерение концентрации радона в воздухе помещений. При этом концентрации радона в помещении значительно варьируются в зависимости от времени суток, погодных условий, а также времени года. Таким образом, для корректной оценки радоновой обстановки внутри помещений зданий требуется проведение серии измерений объемной активности радона.

С целью получения значений нормируемых параметров, их анализа, прогнозирования концентраций радона в воздухе помещений и оценки уровня радиационного воздействия на население на стадии проектирования применяется компьютерное моделирование. Применение имитационных моделей позволяет выявить основные факторы, определяющие свойства изучаемого объекта, в том числе, исследовать отклик моделируемой системы на изменения ее параметров, начальных условий или воздействий на эту систему.

4.1 Исходные данные

В работе представлены результаты моделирования процесса диффузии радона, выполненного для жилого здания 10x10x3(h) метров с подвалом и техническим этажом. Расчет выполнен для случая с предусмотренной теплоизоляцией ограждающих конструкций здания, а также без нее. В качестве теплоизолирующего материала были приняты плиты из пенополистирола. Материал панелей, внутренних перегородок и плит перекрытия – тяжелый бетон.

Таблица 4.1 – Разрез конструктивных элементов проектируемого здания

Конструкция пола и стен проектируемого здания без теплоизоляции	Конструкция пола и стен проектируемого здания с теплоизоляцией
Разрез фундаментной плиты	
<p>1</p> 	
Конструкция пола 1 этажа	
<p>2</p> 	
Конструкция пола технического этажа	
	
Разрез наружной стеновой ограждающей конструкции	
<p>3</p> 	

Численные характеристики материалов и параметры процесса диффузии представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Численные характеристики материалов и параметры процесса диффузии

	Параметр	Единицы измерения	Значение
1	Плотность бетона	кг/м ³	2340
2	Плотность грунта	кг/м ³	1400
3	Удельная активность Ra-226 в бетоне	Бк/кг	19,1
4	Удельная активность Ra-226 в грунте	Бк/кг	30
5	Коэффициент диффузии радона в бетоне	м ² /с	3,5·10 ⁻⁸
6	Коэффициент диффузии радона в грунте	м ² /с	5·10 ⁻⁶
7	Коэффициент эманирования для бетона при относительной влажности воздуха φ=41%	-	0,08
8	Коэффициент эманирования для грунта	-	0,20
9	Постоянная распада радона	с ⁻¹	2,1·10 ⁻⁶

4.2 Определение плотности потока радона

Повышенные концентрации радона в воздухе помещений зданий обусловлены его переносом через трещины и полости в ограждающих конструкциях. Основным параметром, характеризующим интенсивность выхода радона с поверхности грунта или строительных конструкций, является плотность потока радона.

При выборе участка под строительство проводят инженерно-геологические изыскания, включающие мероприятия по измерению плотности потока радона из грунта в периметре здания. Значение плотности потока радона для строительства жилых и общественных зданий не должно превышать 80 мБк/(м²·с), для зданий производственного назначения – 250 мБк/(м²·с). В случае превышения нормируемого показателя необходимо устройство противорадоновой защиты. Класс требуемой противорадоновой за-

щиты здания определяется в зависимости от плотности потока радона из почвы согласно [12].

Таблица 4.3 – Класс требуемой противорадоновой защиты здания

Класс требуемой противорадоновой защиты здания		Средняя по площади здания плотность потока радона на поверхности грунта, мБк/(м ² ·с)
1	Противорадоновая защита обеспечивается за счет нормативной вентиляции помещений	Менее 80
2	Умеренная противорадоновая защита	От 80 до 200
3	Усиленная противорадоновая защита	Более 200

При этом измерения ППР производят на поверхности почвы, дна котлована или на нижней отметке фундамента здания. Проведение измерений на поверхности льда и на площадках, залитых водой, не допускается.

В процессе исследования было получено значение плотности потока радона с поверхности грунта (рисунок 4.2).

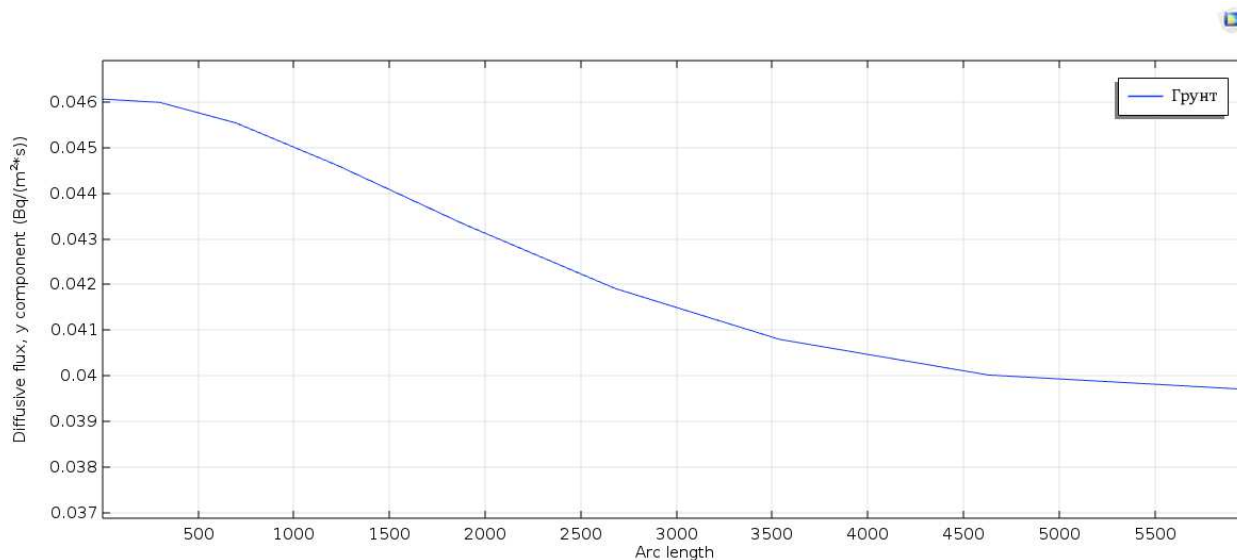


Рисунок 4.2 – Кривая плотности потока радона с поверхности грунта застроенного участка

Плотность потока радона на поверхности грунта вблизи ограждающих конструкций здания составила 0,046 Бк/(м²·с); по мере удаления от боковых

панелей значение ППР уменьшалось до постоянного значения 0,040 Бк/(м²·с). Так, согласно [12] снижение содержания радона в воздухе помещений здания должно обеспечиваться за счет нормативной вентиляции помещений, т.к. полученные значения плотности потока радона не превысили установленный норматив.

Характерные кривые плотности потока радона с поверхности плит перекрытия и вертикальных ограждающих конструкций представлены на рисунках 4.3-4.6.

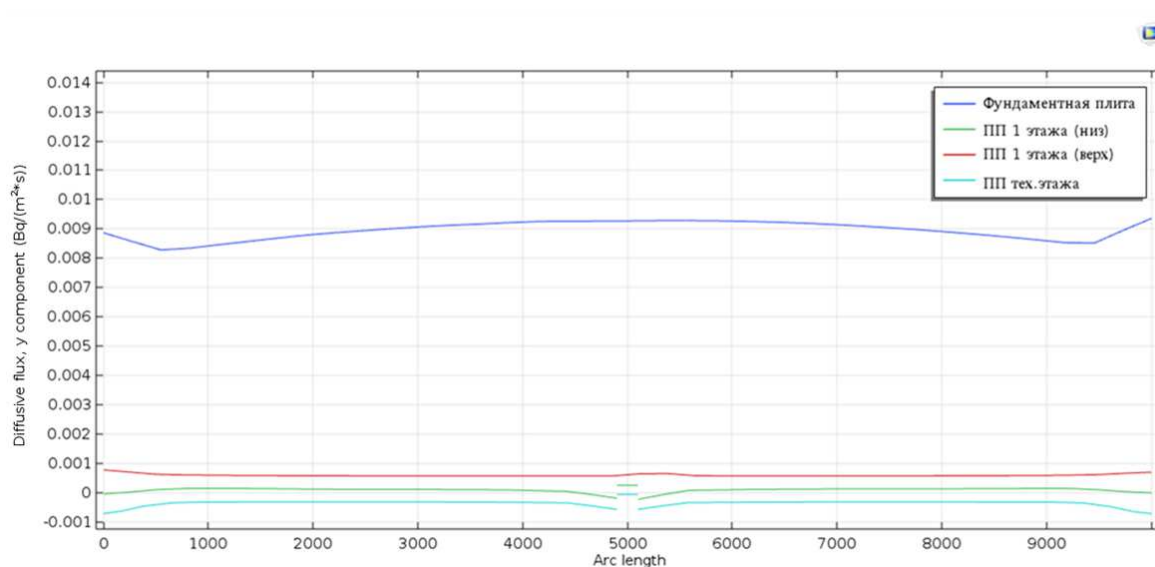


Рисунок 4.3 – ППР с поверхности плит перекрытия без применения теплоизоляционных материалов

Полученные значения плотности потока радона с поверхности фундаментной плиты, в среднем, в 8-9 раз, превышают показатель для плит перекрытия, что связано с интенсивным выходом радона из грунтов под зданием. В узлах перекрытий наблюдаются повышенные значения ППР, что связано с дополнительным потоком радона из массивных конструкций. Отрицательные значения ППР указывают на направление потока радона внутрь помещения.

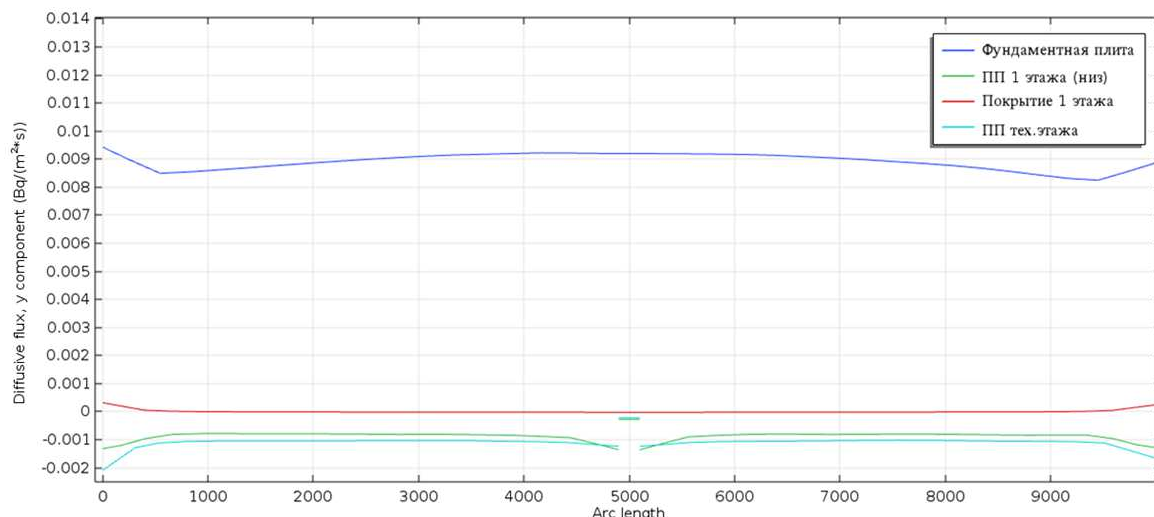


Рисунок 4.4 - ППР с поверхности плит перекрытия с применением теплоизоляционных материалов

Поток радона с поверхности теплоизолированного покрытия 1 этажа находится в пределах нулевых значений за счет свойств теплоизоляционного материала. Однако за счет этого наблюдается увеличение интенсивности выхода радона с поверхности плиты перекрытия 1 этажа внутрь подвала в 2-3 раза. Также отмечается увеличение плотности потока с поверхности плиты перекрытия технического этажа внутрь жилого помещения.

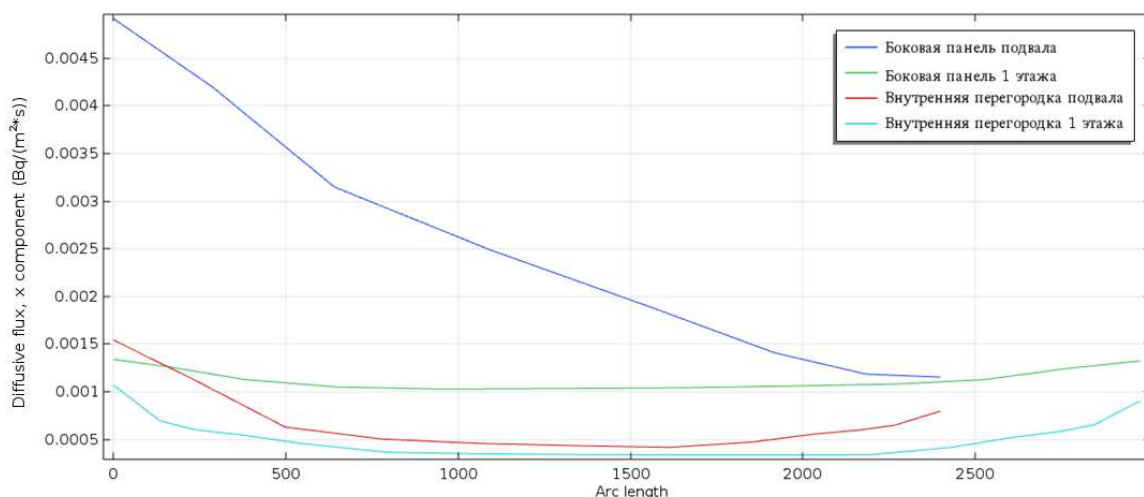


Рисунок 4.5 – ППР с поверхности стеновых панелей без применения теплоизоляционных материалов

Значения плотности потока радона с боковой панели подвала убывают от своего максимального значения у поверхности фундаментной плиты к ми-

нимальному значению в узле перекрытия 1 этажа. Плотность потока радона с поверхности панели 1 этажа имеет максимальные значения в узлах перекрытий и минимальное – в центральной части конструкции. ППР с поверхности внутренних перегородок значительно меньше, чем с поверхности наружных панелей за счет меньшей толщины конструкции.

В случае с утепленными ограждающими конструкциями интенсивность выхода радона из панелей принимает следующий вид (рисунок 4.6).

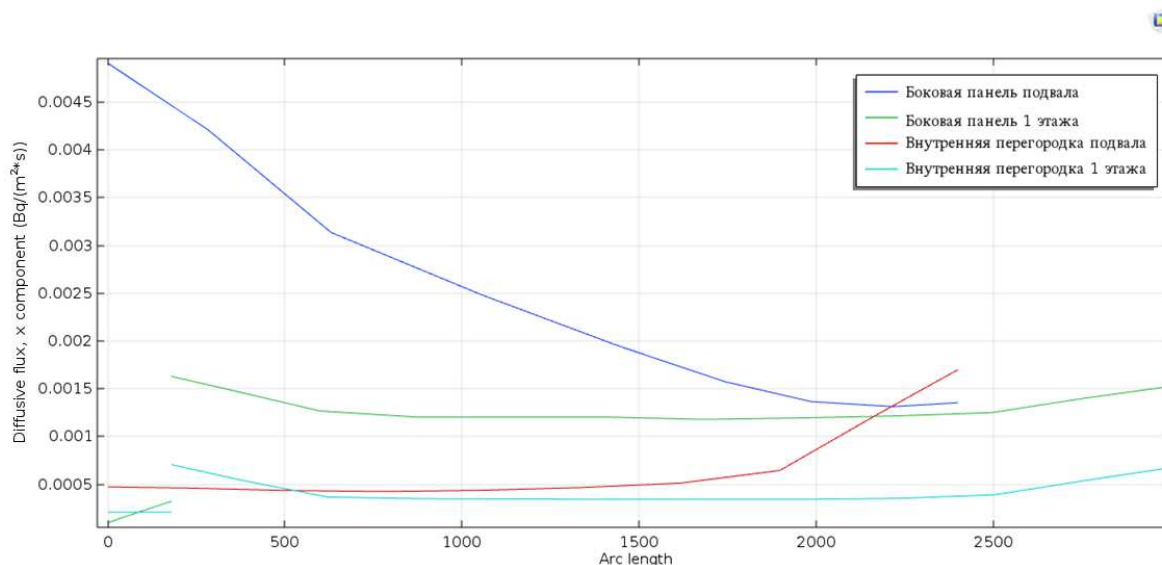


Рисунок 4.6 – ППР с поверхности стеновых панелей с применением теплоизоляционных материалов

Кривая плотности потока радона для боковой панели 1 этажа имеет вид прямой с постоянным значением $0,0012 \text{ Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и с повышенными значениями ППР в узлах пересечения строительных конструкций. Резкий скачок с $0,5$ до $1,7 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ наблюдается в области пересечения теплоизоляционного покрытия с боковой панелью 1 этажа.

Значения плотности потока радона с поверхностей ограждающих конструкций, полученные экспериментальным путем и в процессе моделирования представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Значения ППР с поверхности ограждающих конструкций здания и грунтов

	Плотность потока радона с поверхности конструкций без теплоизоляции, Бк/м ² ·с	Плотность потока радона с поверхности конструкций с теплоизоляцией, Бк/м ² ·с
Фундаментная плита	$9,1 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$
Плита перекрытия 1 этажа (низ)	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$
Боковая панель подвала	$1,3 \cdot 10^{-3} - 4,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3} - 4,8 \cdot 10^{-3}$
Внутренняя перегородка подвала	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Плита перекрытия 1 этажа (верх)	$0,58 \cdot 10^{-3}$	$0,02 \cdot 10^{-3}$
Плита перекрытия технического этажа	$0,31 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Боковая панель 1 этажа	$0,6 \cdot 10^{-3} - 1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Внутренняя перегородка 1 этажа	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$
Расчетное значение, полученное в результате лабораторного эксперимента, по уравнению (2.11)	$0,16 \cdot 10^{-3}$	
С поверхности грунта	$40 \cdot 10^{-3} - 46 \cdot 10^{-3}$	
С поверхности грунта (норматив)	$< 80 \cdot 10^{-3}$	

4.3 Определение длины диффузии радона

Длина диффузии радона характеризует расстояние, на котором активность радона, проходящего через слой материала вследствие диффузии, уменьшается в результате распада в e раз. Длина диффузии является одним из параметров, определяющих скорость выхода радона из стеновых ограждений, и, как следствие – объемную активность радона в помещении.

Длина диффузии радона для грунта составила:

$$L_{\Gamma} = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-6}}{2,1 \cdot 10^{-6}}} = 1,54 \text{ м.}$$

Для бетонных плит перекрытия и панелей:

$$L_6 = \sqrt{\frac{3,5 \cdot 10^{-8}}{2,1 \cdot 10^{-6}}} = 0,13 \text{ м.}$$

4.4 Скорость поступления радона в воздух помещения

Скорость поступления радона через ограждающие конструкции за счет диффузии определялась по формуле 2.12.

Таблица 4.5 – Средняя скорость поступления радона в помещение

	Площадь поверхности, м ²	Скорость поступления радона в помещение с поверхности конструкций без теплоизоляции, Бк/с	Скорость поступления радона в помещение с поверхности конструкций с теплоизоляцией, Бк/с
Фундаментная плита	100	0,91	0,91
Плита перекрытия 1 этажа (низ)	100	0,014	0,08
Боковая панель подвала	96	0,29	0,29
Внутренняя перегородка подвала	96	0,048	0,048
Плита перекрытия 1 этажа (верх)	100	0,058	0,002
Плита перекрытия технического этажа	100	0,031	0,13
Боковая панель 1 этажа	120	0,12	0,14
Внутренняя перегородка 1 этажа	120	0,048	0,048
– В воздух подвальных помещений	-	1,26	1,33
– В воздух жилых помещений	-	0,25	0,32
– В воздух помещений здания, рассчитанная по данным, полученным в результате лабораторного эксперимента ¹	832	0,14	

¹С целью оценки поступления радона только через ограждающие конструкции в этом расчете нами не учитывалось влияние потока радона из грунта через монолитную фундаментную плиту.

Аналогичные расчеты были выполнены при относительной влажности воздуха в помещениях $\varphi=15$ и $\varphi=93,5\%$. По результатам произведенных расчетов были получены графики изменения скорости поступления радона в воздух подвальных (рисунок 4.7) и жилых помещений (рисунок 4.8).

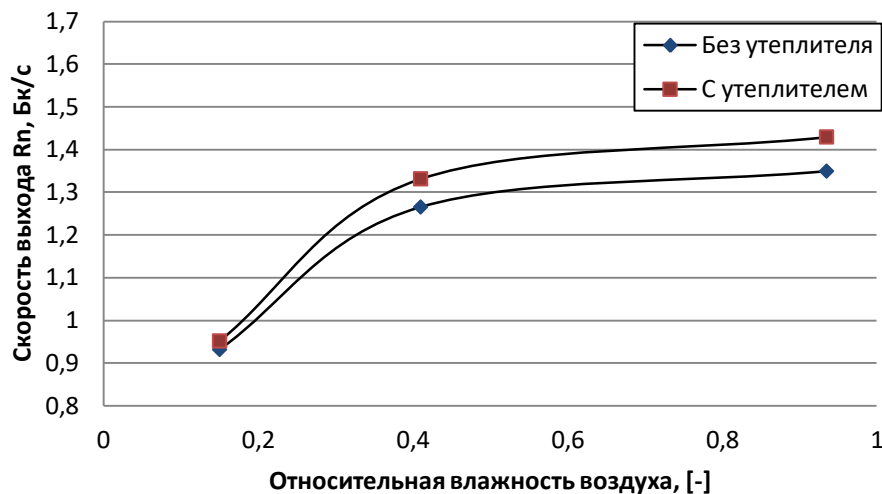


Рисунок 4.7 – Изменение скорости поступления радона в воздух подвальных помещений

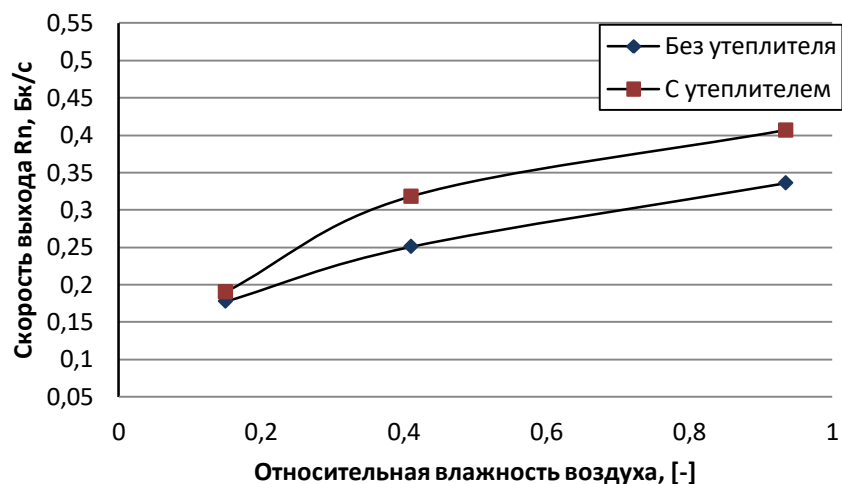


Рисунок 4.8 – Изменение скорости поступления радона в воздух жилых помещений

Так, при повышении относительной влажности воздуха, скорость поступления радона в воздух помещений возрастает. Применение теплоизоля-

ционных материалов приводит к увеличению скорости выхода радона из строительных материалов ограждающих конструкций для влажности, установленной [51], на 4-12%, расчетной - на 5-21%.

4.5 Распределение концентраций радона в воздухе помещений

С помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics было получено распределение концентраций радона в стационарном состоянии без учета конвективного переноса вещества в воздухе помещений, строительных материалах и грунте для случая без применения теплоизоляционных материалов, а также для случая с предусмотренной теплоизоляцией ограждающих конструкций при относительной влажности воздуха $\varphi=41\%$, что является оптимальным значением для жилых и общественных зданий. Распределение радона в грунтах, строительных материалах и воздухе помещений в общем виде представлено на рисунке 4.9.

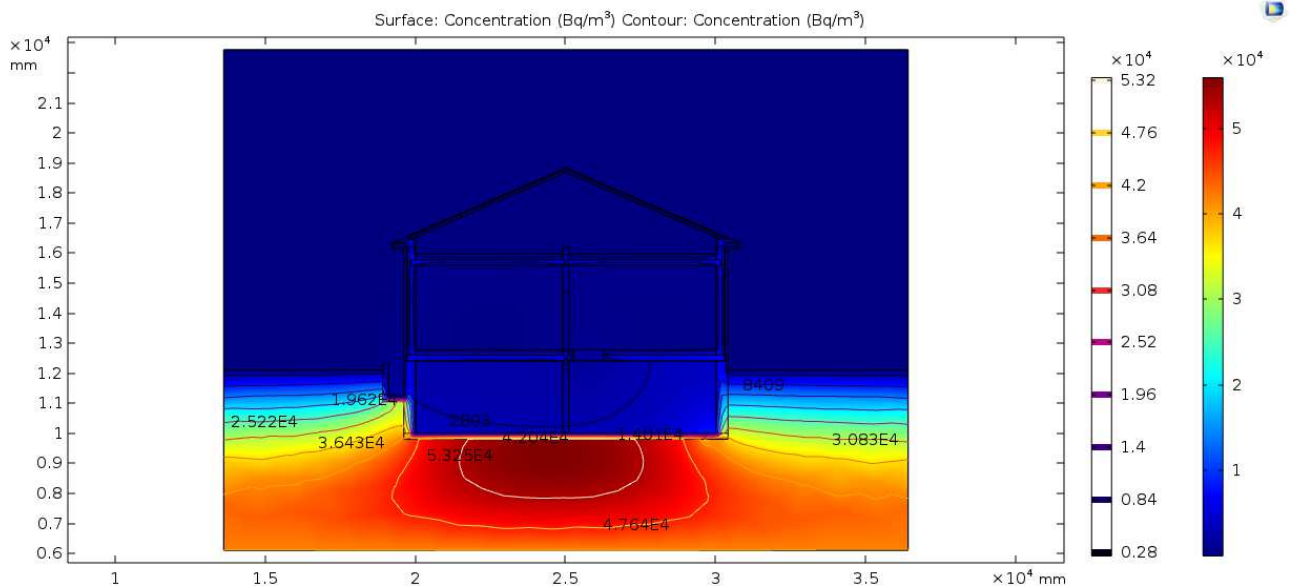


Рисунок 4.9 – Распределение концентрации радона в воздухе помещений, строительных материалах и грунтах

Из представленных выше данных видно, что концентрация радона в грунте распределяется неравномерно. Минимальные значения наблюдаются

на поверхности грунта, по мере увеличения глубины залегания грунтов концентрация увеличивается. Основание здания препятствует свободному выходу радона на поверхность, что обуславливает повышенные значения концентрации радона в области центральной оси здания.

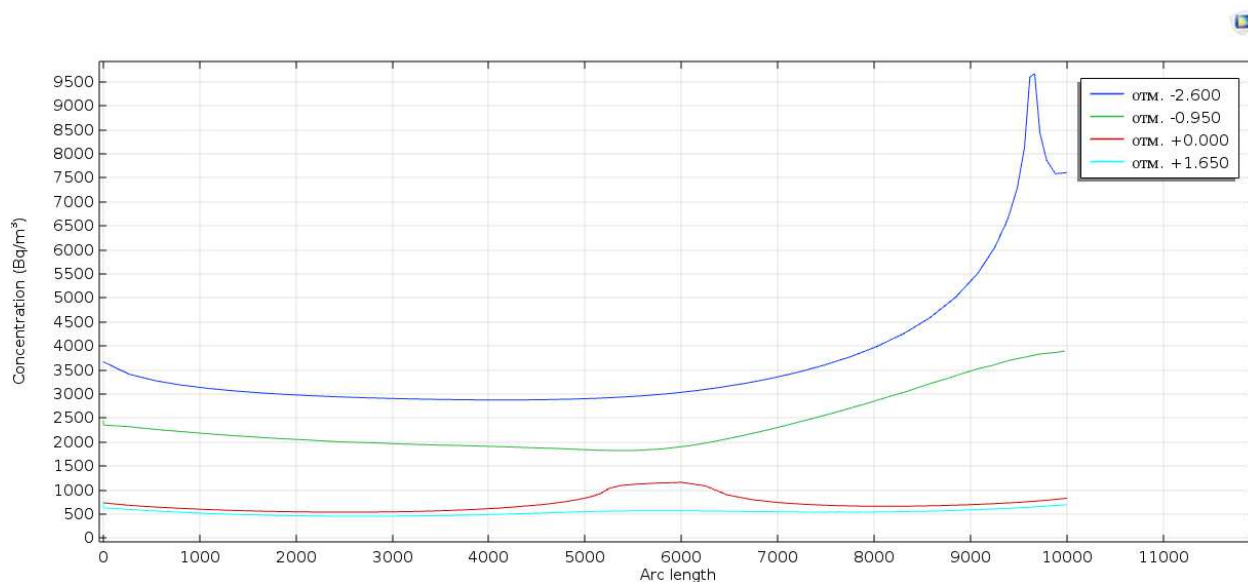


Рисунок 4.10 – Концентрации радона в помещениях здания без применения теплоизоляционных материалов ограждающих конструкций

Полученные данные позволяют утверждать, что распределение радона внутри здания также неравномерно. Наибольшие концентрации наблюдаются в подвальном помещении вдоль фундаментной плиты (отм. -2.600), при этом в области ввода инженерных сетей в здание концентрации могут достигать нескольких тысяч Бк/м³. На отметке -0,950 от уровня чистого пола концентрация радона составляет, в среднем, 70% от значения концентраций вдоль фундаментной плиты. При этом в области ввода инженерных сетей, концентрации также возрастают приблизительно на 40%.

В жилых помещениях расчетные значения концентрации находятся в интервале от 450 до 900 Бк/м³, что превышает установленный нормами [11] уровень среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности радона в воздухе помещений. Закономерно несколько повышенные значения

(1200 Бк/м³) концентраций наблюдаются в области, соединяющей помещения подвального и первого этажей.

Кривые концентрации радона в помещениях здания с предусмотренной теплоизоляцией ограждающих конструкций представлено на рисунке 4.11.

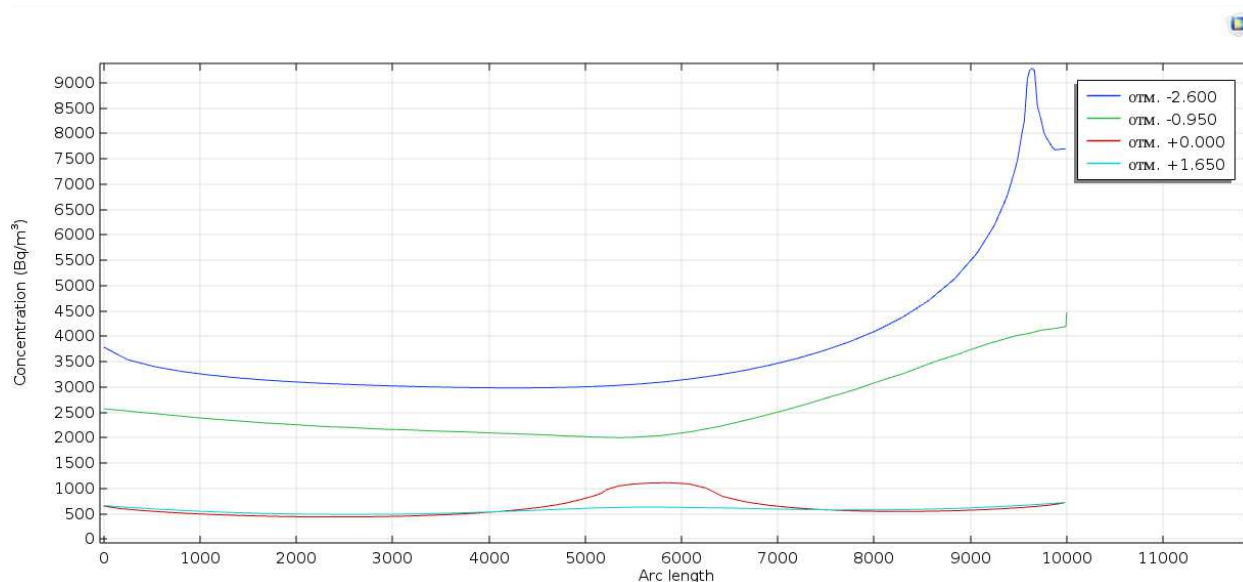
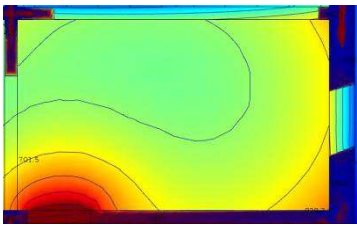
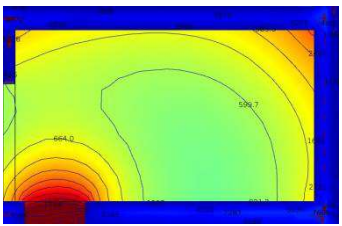

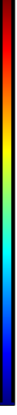
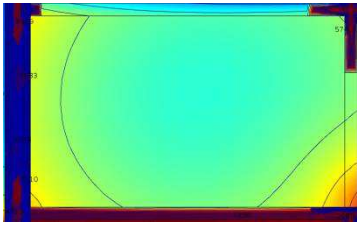
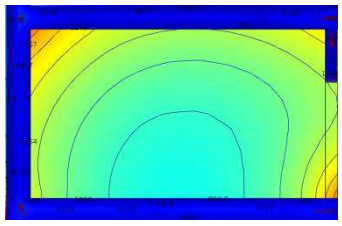
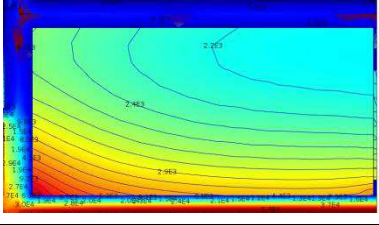
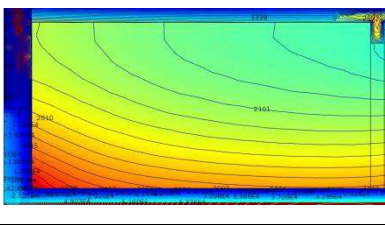


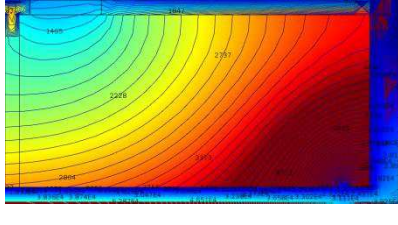
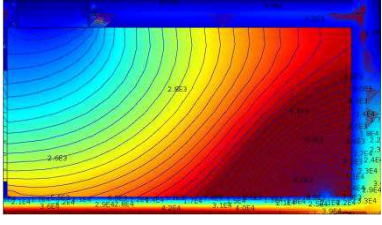


Рисунок 4.11– Концентрации радона в помещениях здания с предусмотренной теплоизоляцией ограждающих конструкций

Значения концентраций радона вдоль фундаментной плиты не изменились, однако, за счет повышенной интенсивности выхода радона с поверхности плиты перекрытия 1 этажа внутрь подвального помещения концентрации в центральной части помещений возросли на 8-10%.

Разброс значений концентраций в воздухе жилых помещений также находится в пределах значений 500-900 Бк/м³. При этом, относительно полученных данных для случая без применения теплоизоляционных материалов, концентрации вдоль плиты перекрытия 1 этажа уменьшились, а концентрации в центральной части помещения возросли, в среднем, на ту же величину. Более подробное распределение концентраций и их значения представлены на разрезах жилых (1,2) и подвальных (3,4) помещений здания в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Концентрация радона в помещениях здания с учетом теплоизоляции ограждающих конструкций и без нее

	Концентрация радона в помещениях без теплоизоляции ограждающих конструкций	Концентрация радона в помещениях с предусмотренной теплоизоляцией ограждающих конструкций	Шкала измерения
1			<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> $\times 10^3$  </div> <div style="text-align: center;"> $\times 10^4$  </div> </div>
2			
3			<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> $\times 10^3$  </div> <div style="text-align: center;"> $\times 10^4$  </div> </div>
4			

Так, основным источником радона в подвальном помещении здания являются грунты под зданием, при этом в области негерметизированного ввода инженерных сетей концентрации могут превышать норматив более чем в 20 раз, что требует дополнительных мероприятий по устройству противорадоновой защиты. Концентрация радона на первом этаже здания также превышает допустимые нормы; наибольшие значения наблюдаются вдоль поверхности вертикальных ограждающих конструкций; в случае с примени-

ем теплоизоляционных материалов – также вдоль верхней плиты перекрытия. В свою очередь, отсутствие теплоизоляционных материалов в конструкции пола 1 этажа способствует значительному потоку радона внутрь жилых помещений из подвальных помещений здания.

Выводы по четвертой главе

1. Наибольшие значения ППР с поверхности ограждающих конструкций здания наблюдаются вдоль фундаментных плит за счет интенсивного выхода радона из грунтов под зданием; повышенные значения ППР наблюдаются в узлах перекрытий со стеновыми панелями, что связано с дополнительным потоком радона из массивных конструкций.
2. Для теплоизолированных конструкций скорость выхода радона в воздух помещения со стороны неизолированной ее части возрастает на 5-28%, что связано с изменением толщины конструкции, которая, в свою очередь, формирует плотность потока радона с поверхности пола или панели.
3. По результатам численного моделирования при заданных условиях было установлено, что в пределах расчетных и оптимальных значений влажности воздуха в помещении скорость поступления радона увеличивается почти в 1,5-2 раза.
4. Повышение влажности воздуха способствует увеличению скорости выхода радона из материалов ограждающих конструкций и приводит к повышенным значениям концентраций радона в воздухе помещения.
5. Наибольшие концентрации наблюдаются в подвальных помещениях, что связано с повышенным потоком радона из грунтов под зданием; в области ввода инженерных сетей в здание концентрации могут достигать нескольких тысяч Бк/м³, что обуславливает необходимость их герметизации.
6. Концентрация радона на первом этаже здания распределяются неравномерно. Отсутствие теплоизоляционных материалов в конструкции пола 1

этажа способствует значительному потоку радона внутрь жилых помещений из подвальных помещений здания. Применение утеплителей в составе строительных конструкций приводит к герметизации помещений и вносит еще больший вклад в радиационную обстановку внутри здания

ГЛАВА 5. Мероприятия по защите от радона

В настоящее время применяются различные технические решения по обеспечению радиационной безопасности внутри зданий, однако, по-прежнему не определены нормированные параметры, которые позволили бы количественно оценить их эффективность. Единственным критерием, позволяющим оценить радиационную безопасность внутри помещений, является непосредственное измерение объемной активности радона в воздухе [55].

Необходимо отметить, что мероприятия по снижению концентрации радона наиболее эффективны на стадиях проектирования и строительства, чем мероприятия, проводимые в уже построенном здании.

Основные мероприятия, предусматриваемые для снижения концентрации радона в воздухе помещений, представлены в таблице.

Таблица 5.1 – Перечень технических решений противорадоновой защиты [55]

№	Типы технических решений	Элементы конструкций или оборудование
1	Естественная вентиляция подвальных помещений	Вентиляционные проемы в цокольных стенах, обеспечивающие кратность воздухообмена в зимнее время не менее $0,5 \text{ ч}^{-1}$
2	Принудительная вентиляция подвальных помещений	Система принудительной приточно-вытяжной вентиляции, обеспечивающая кратность воздухообмена в зимнее время не менее $1,0 \text{ ч}^{-1}$
3	Покрытие	Защитный слой из бетона, защитный слой из цементно-песчаного раствора, покрытие из мастичного материала, выравнивающий слой из цементно-песчаного раствора, бетонная подготовка
4	Мембрана	Защитный слой из бетона, защитный слой из цементно-песчаного раствора, 1-2 слоя рулонного гидроизоляционного материала, выравнивающий слой из цементно-песчаного раствора, бетонная подготовка

5	Барьер	Сплошная монолитная плита из трещинностойкого железобетона, бетонная подготовка, песчаная подсыпка
6	Барьер+покрытие	Сплошная монолитная плита из трещинностойкого железобетона, защитный слой из цементно-песчаного раствора, 2-3 слоя ралонного гидроизоляционного материала, выравнивающий слой из цементно-песчаного раствора, бетонная подготовка
7	Барьер+мембрана	Сплошная монолитная плита из трещинностойкого железобетона, защитный слой из цементно-песчаного раствора, 2-3 слоя рулонного гидроизоляционного материала, выравнивающий слой из цементно-песчаного раствора, бетонная подготовка
8	Барьер+мембрана (покрытие)+коллектор радона+депрессия коллектора путем естественной вытяжки почвенного газа	Сплошная монолитная плита из трещинностойкого железобетона, защитный слой из цементно-песчаного раствора, 2-3 слоя рулонного гидроизоляционного материала, выравнивающий слой из цементно-песчаного раствора, стяжка из тощего бетона, слой гравия + вытяжные трубы, песчаная подсыпка
9	То же + депрессия коллектора путем принудительной вытяжки почвенного газа	То же + вентиляционное оборудование

Наиболее распространенными методами снижения концентрации радона в воздухе помещений являются непосредственно изменение режимов проветривания и устройство пассивной радоноизоляции путем устройства барьеров, мембран и покрытий.

5.1 Определение требуемой кратности воздухообмена в здании и расчет энергозатрат

Величина равновесной объемной активности радона в воздухе зданий существенно зависит от кратности воздухообмена. В свою очередь, увеличение кратности воздухообмена внутри помещения весьма ограничено в холодное время года по той причине, что значительно возрастают потери тепла, и, как следствие, увеличиваются энергозатраты на их восполнение.

Кратностью воздухообмена называют отношение часового объемного расхода приточного воздуха или расхода вытяжного воздуха к объему вентилируемого помещения. Нормативная кратность воздухообмена для рядовых помещений здания приведена в справочной литературе и СП для зданий различного назначения.

Эквивалентная равновесная объемная активность радона в воздухе подвальных и жилых помещений с учетом требуемой кратности воздухообмена для снижения концентраций до установленного уровня были рассчитаны по формуле

$$\text{ЭРОА} = C_0 \cdot f, \quad (5.1)$$

где f – коэффициент радиоактивного равновесия радона с дочерними продуктами его распада, $f = 0,5$.

Таблица 5.2 – Величина ЭРОА radона в подвальных помещениях здания с учетом требуемого воздухообмена

Кратность воздухообмена, ч ⁻¹	ЭРОА в воздухе помещений (без теплоизоляции ограждающих конструкций), Бк/м ³		ЭРОА в воздухе помещений (с теплоизоляцией ограждающих конструкций), Бк/м ³	
	φ=41%	φ=93,5%	φ=41%	φ=93,5%
n=0,1	10719,3	11484,6	11314,5	12159,9
n=1	1076,4	1153,0	1136,0	1216,0
n=2	540,7	579,0	570,5	613,0
n=3	362,1	387,7	382,0	405,3
n=4	272,9	292,0	287,7	304,0
n=5	219,3	234,6	231,2	243,2
n=5,5	199,8	213,7	210,6	221,1
n=6		196,3	193,5	202,7
n=6,5				187,1

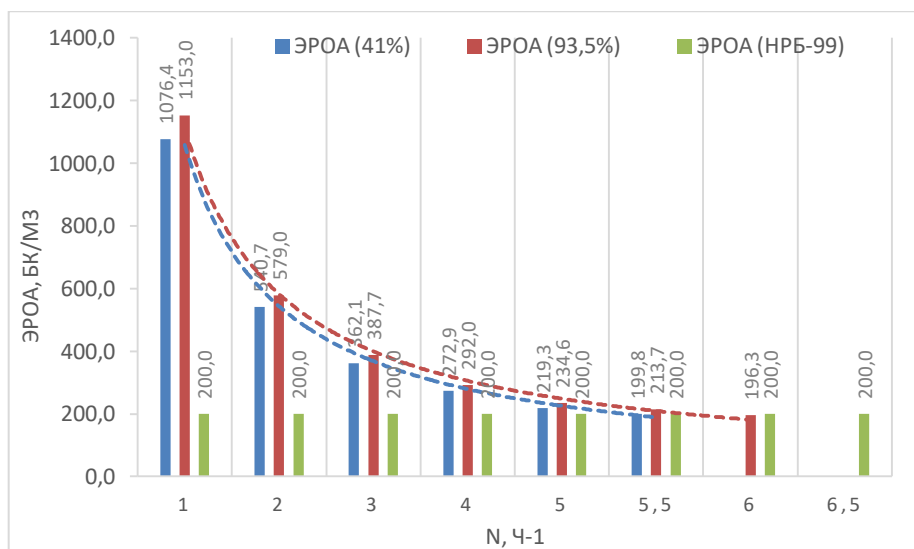


Рисунок 5.1 – Зависимость ЭРОА радона от величины воздухообмена в подвальных помещениях здания (без теплоизоляции ограждающих конструкций)

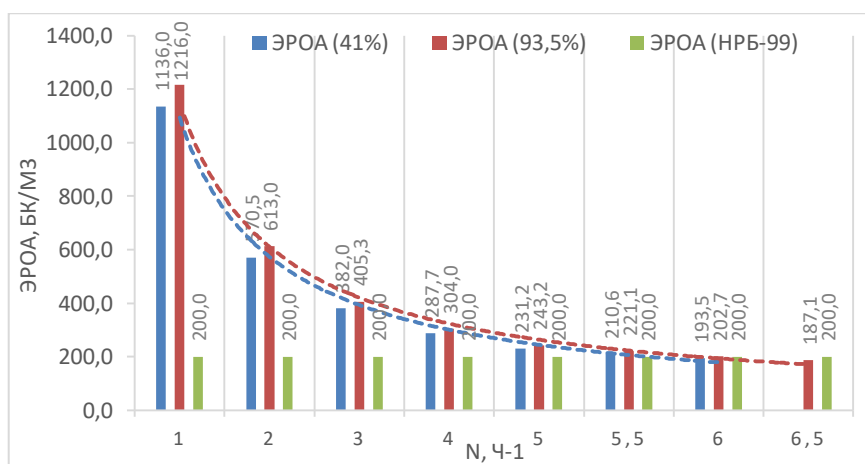


Рисунок 5.2 – Зависимость ЭРОА radона от величины воздухообмена в подвальных помещениях здания (с теплоизоляцией ограждающих конструкций)

Таблица 5.3 – Величина ЭРОА radона в жилых помещениях здания с учетом требуемого воздухообмена

Кратность воздухообмена, ч ⁻¹	ЭРОА в воздухе помещений (без теплоизоляции ограждающих конструкций), Бк/м ³		ЭРОА в воздухе помещений (с теплоизоляцией ограждающих конструкций), Бк/м ³	
	φ=41%	φ=93,5%	φ=41%	φ=93,5%
n=1	203,4	274,8	259,0	294,1
n=1,1	185,4	250,3	235,9	267,8
n=1,2		229,9	216,6	245,9
n=1,3		212,6	200,4	227,4
n=1,4		197,7	186,4	211,5
n=1,5				197,7

Так, увеличение кратности воздухообмена в жилых помещениях на 0,1 ч⁻¹ позволяет снизить ЭРОА в воздухе помещения, в среднем, на 8,8-7% при нормальной относительной влажности воздуха, и на 7-6,6% – при повышенной.

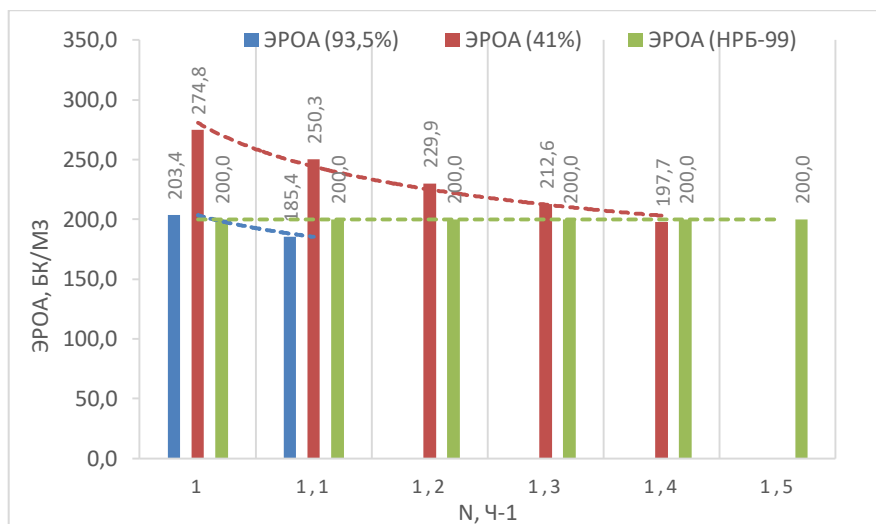


Рисунок 5.3 – Зависимость ЭРОА radона от величины воздухообмена в жилых помещениях здания (без теплоизоляции ограждающих конструкций)

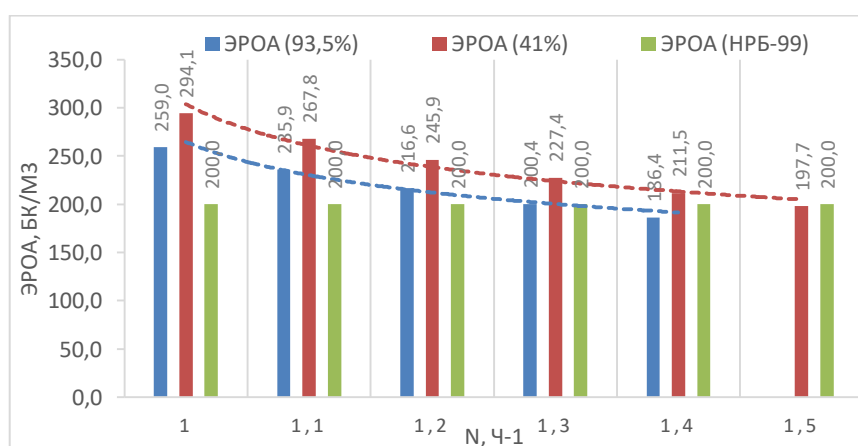


Рисунок 5.4 – Зависимость ЭРОА radона от величины воздухообмена в жилых помещениях здания (с теплоизоляцией ограждающих конструкций)

Из представленных данных видно, что при заданных условиях для снижения ЭРОА в воздухе подвальных помещений до установленного норматива требуется увеличить кратность воздухообмена, в среднем, на $n=4,5-5,5 \text{ ч}^{-1}$. Для жилых помещений – на $n=0,2-0,5 \text{ ч}^{-1}$. При повышении относительной влажности воздуха, величина требуемого воздухообмена также возрастает.

Расход поступающего в помещение воздуха, который необходимо нагреть до температуры 20°C [51], определяется по формуле

$$L = k \cdot V, \quad (5.2)$$

где k – кратность воздухообмена, м³/м²·ч;

V – объем помещения, м³.

Расход тепловой энергии на нагрев поступающего атмосферного воздуха:

$$P = L \cdot \rho_{\text{возд}} \cdot c_{\text{возд}} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}), \quad (5.3)$$

где $\rho_{\text{возд}}$ – плотность сухого воздуха при $t=15^\circ\text{C}$, $\rho_{\text{возд}}=1,225$ кг/м³;

$c_{\text{возд}}$ – удельная теплоемкость воздуха, $c_{\text{возд}} = 0,24$ ккал/(кг·°C);

$t_{\text{вн}}$ – температура воздуха в помещении, $t_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$ [51];

$t_{\text{нар}}$ – среднесуточная температура атмосферного воздуха, $t_{\text{нар}} = -6,5^\circ\text{C}$ [57].

$$P = 300 \cdot 0,5 \cdot 1,225 \cdot 0,24 \cdot (20 - (-6,5)) = 1168,6 \text{ Вт/ч.}$$

Средний месячный расход тепловой энергии составляет:

$$P_{\text{мес}} = 1168,6 \cdot 24 \cdot 30 = 471,2 \text{ кВт.}$$

Затраты на тепловую энергию за период отопительного сезона составляют:

$$\Delta \mathcal{E} = P \cdot z \cdot T_{\text{т.э.}}, \quad (5.4)$$

где z – период отопительного сезона, $z=235$ сут;

$T_{т.э.}$ – тариф на тепловую энергию, руб/Гкал. Согласно приказу Региональной энергетической комиссии Красноярского края от 19.12.2017 № 540-п «Об установлении долгосрочных тарифов на услуги по передаче тепловой энергии по сетям общества с ограниченной ответственностью «Красноярский жилищно-коммунальный комплекс», тариф на тепловую энергию для населения с учетом НДС с 01.01.2020г. по 30.06.2020г. составляет 1702,46 руб/Гкал.

$$\Delta Э = \frac{1168,6 \cdot 24 \cdot 235 \cdot 1702,16}{1163} = 9\,649,40 \text{ руб.}$$

Так, при увеличении кратности воздухообмена на каждые $0,1 \text{ ч}^{-1}$ затраты на энергоресурсы для стандартного дома возрастают на 1 929,88 руб/год.

Выводы к пятой главе

1. С целью снижения объемной активности радона до установленных нормативов могут применяться различные технические решения. На стадии эксплуатации здания наиболее распространенным мероприятием является увеличение кратности воздухообмена в помещениях.
2. При этом, применение теплоизоляционных материалов в составе строительных конструкций приводит к герметизации помещений и вносит еще больший вклад в радиационную обстановку внутри здания. Так, мероприятия, направленные на энергоэффективность и ресурсосбережение приводят к увеличению потребления энергоресурсов.
3. Увеличение кратности воздухообмена в жилых помещениях на $0,1 \text{ ч}^{-1}$ позволяет снизить ЭРОА в воздухе помещения, в среднем, на 8,8-7% при нормальной относительной влажности воздуха, и на 7-6,6% – при повышенной.

4. При этом, увеличение кратности воздухообмена на каждые $0,1 \text{ ч}^{-1}$ приводит к повышению затрат на энергоресурсы по текущему тарифу г.Красноярска на 1 929,88 руб/год.

5. Так, наиболее рациональным решением представляется контроль и регулирование такого показателя, как содержание радона, на стадии проектирования зданий и сооружений. С этой целью разрабатываются карты радоноопасности территорий, совершенствуется нормативно-законодательная база РФ, а также предлагаются эффективные мероприятия по противорадоновой защите населения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обзор отечественных и зарубежных работ показал, что эманирование строительных материалов является актуальной, однако, сравнительно малоизученной темой исследований. Одним из основных внешних факторов, способных существенно влиять на процесс эманирования, является влажность. Влиянию влажности посвящены редкие работы в области эманирования горных пород. В свою очередь, практически не изучено влияние влажности на коэффициент эманирования радона многокомпонентных строительных материалов, состав и структура которых значительно отличаются от состава и структуры горных пород и грунтов. Относительная влажность воздуха в помещениях зданий, а, следовательно, и сорбционная влажность строительных материалов, способна варьироваться в широких пределах, что обуславливает практическую значимость проводимых исследований.

2. Правовой нормативной документацией РФ установлены требования к содержанию естественных радионуклидов в составе исходного минерального сырья и готовых строительных изделий; установлены требования к плотности потока радона с поверхности грунта, к величине ЭРОА в воздухе помещений, однако, эффективный параметр процесса эманирования, непосредственно влияющий на концентрации радона в воздухе помещений за счет эманирования строительных конструкций – коэффициент эманирования, – не нормируется.

3. В процессе исследования были проведены необходимые измерения и расчеты с использованием гамма-спектрометрических и эманионных методов, позволяющих определить коэффициенты эманирования образца тяжелого бетона при различной относительной влажности воздуха.

Экспериментально установлено, что эманирование строительного материала – тяжелого бетона – определяется процессами сорбции-десорбции водяных паров. При увеличении относительной влажности воздуха в интервалах исследуемых значениях влажности коэффициент эманирования возрастает.

тает почти в 2 раза, однако, в отличие от величины сорбционной влажности, возрастающей с увеличением относительной влажности воздуха, величина эманирования снижается.

Получено уравнение, описывающее зависимость относительной влажности воздуха, определяющей сорбционную влажность материала, и коэффициентом эманирования.

4. В программном комплексе Comsol Multiphysics был смоделирован процесс диффузии радона в системе грунт-атмосфера-здание. Получены искомые значения плотности потока радона с поверхности ограждающих конструкций при полученных в ходе эксперимента значениях удельной активности радия, коэффициентах эманирования и заданных, на основании приведенных в литературе данных, типичных значениях удельной активности радия, коэффициенте эманирования грунта, его плотности, а также коэффициентах диффузии для грунта и тяжелого бетона.

По результатам численного моделирования при заданных условиях было установлено, что в пределах допустимых и оптимальных значений влажности воздуха в помещении скорость поступления радона увеличивается в 1,5-2 раза, что способствует повышенным значениям концентраций радона в воздухе помещения.

5. Полученные данные позволяют спрогнозировать вероятные концентрации радона в воздухе помещений моделируемого здания. В процессе работы было показано, что применение теплоизоляционных материалов приводит к увеличению скорости поступления радона в воздух помещения со стороны неизолированной части конструкции за счет изменения ее толщины, которая, в свою очередь, формирует плотность потока с поверхности пола или конструкции.

Наибольшие концентрации наблюдаются в подвальных помещениях за счет эманирования радона из грунтов под зданием, а также в области ввода инженерных сетей в здание, что обуславливает необходимость их герметизации.

6. Выявлена зависимость кратности воздухообмена и равновесных концентраций радона в воздухе помещений. Для снижения величины ЭРОА до установленных нормами пределов требуемая кратность воздухообмена должна быть увеличена, что, в свою очередь, приводит к увеличению потребления энергоресурсов.

Таким образом, относительная влажность воздуха является характеристикой, непосредственно влияющей на величину равновесной концентрации радона в воздухе помещений. Так, показатель процесса эманирования должен быть стандартизирован с учетом влажности и возраста строительных материалов. Кроме того, применение теплоизоляционных материалов с целью повышения энергоэффективности зданий способствует увеличению скорости выхода радона в воздух помещений и приводит к увеличению потребления энергоресурсов на стадии эксплуатации зданий.

Список использованных источников:

1. Федеральный закон "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" N 384-ФЗ от 30.12.2009 г.
2. Бекман И.Н. Радиохимия: Учебное пособие в 7 т. Том VI. Экологическая радиохимия и радиоэкология: учебное пособие / И.Н. Бекман. - М.: Издатель Мархотин П.Ю., 2015. 400 с.
3. Труды МКРЗ. Публикация 115 МКРЗ. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявления по радону. Москва, 2013г. 90с.
4. Левин М.Н., О.П. Негрбов, В.Р. Гитлин, О.В. Селиванова, О.А. Иванова. Радон. Учебное пособие, Воронежский государственный университет, 2008 г. 42 с.
5. Гонсалес А., Андере Ж. Естественные и искусственные источники излучения: ядерная энергия в будущем. Сравнительный анализ источников в среде обитания // Бюллетень МАГАТЭ. - 1989. - №2. - С.23-35.
6. В.В. Коваленко. Введение в прикладную радиогеоэкологию»: учебное пособие для вузов по специальности «Биофизика» и «Физическая экология (физика окруж. среды) / Российская академия наук [РАН], 1998. -106с.
7. Бекман И.Н. Семейства радиоактивных элементов. Курс лекций <http://profbeckman.narod.ru>.
8. Киселев С. М., Жуковский М. В. Современные подходы к обеспечению защиты населения от радона. Международный опыт регулирования // Радиационная гигиена. 2014 г. №4. С.48-52.
9. Чушкин Н. А., Рябкова В. А., Мрачковская А. И. Актуальность изучения отдаленных последствий влияния радона на человека // Дальневосточный медицинский журнал. 2002 г. С.85-87.
10. Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» №3-ФЗ. от 09.01.1996 г.

11. СанПиН 2.6.1.-2523-09. «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009». М.; Центр санитар.-эпидемиолог. нормирования, гигиен. сертификации и экспертизы Минздрава России, 2009. 114 с.
12. СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 83 с.
13. СанПиН 2.6.1.2800-10. «Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения». М.; Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. – 40с.
14. Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадионной защиты. СП 321.1325800.2017 / Введ. с 06.06.2018. – М.: Стандартинформ, 2017. – 35 с.
15. Инженерно-экологические изыскания для строительства: Свод правил по инженерным изысканиям для строительства: СП 11-102-97 / ПНИИИС; Введ. с 15.08.97. – М., 1997.
16. МУ 2.6.1.2398-08 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности», Россия, 2008 г.
17. МУ 2.6.1.2838-11 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности», Россия, 2011 г.
18. ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. – Введ. с 01.01.95. – М.: Изд-во стандартов, 1994.
19. Сердюкова, А.С. Изотопы радона и продукты их распада в природе. / А. С. Сердюкова, Ю. Т. Капитанов. – М.: «Атомиздат», 1975 -С.297.

20. А.Д. Онищенко, А.В. Васильев, Г.П. Малиновский, М.В. Жуковский
Влияние строительных характеристик зданий на накопление радона в детских дошкольных учреждениях Свердловской области. // Радиационная гигиена, №2, том 11, 2018 г. С.28-36.
21. Кургуз С.А. Особенности поэтажного распределения уровней радона в высотном здании. // ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Красноярском крае», г. Красноярск.
22. Е.А. Тимошенко. Проблема поступления радона в жилые помещения и пути подавления радонового риска в экологически безопасном доме. Сборник научных трудов. // Строительство, материаловедение, машиностроение. Вып.82, 2015 г. С.249-255.
23. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. – М.: Атомиздат, 1989 – 120 с.
24. Смыслов А. А., Максимовский В. А., Харламов М. Г. Радон в земной коре и риск радоноопасности // Разведка и охрана недр. 1995г. №5. С.45-53.
25. Каюков П. Г., Федоров Г. В., Бенсман В. А. Радоновый риск в Казахстане и пути его снижения // Материалы семинара «Орхусская конвенция в свете концепции по переходу Республики Казахстан к «зеленой» экономике в секторе использования водных ресурсов Северного Казахстана». Республика Казахстан, Северо-Казахстанская область, г.Петропавловск. 2014г. С.64-71.
26. Ellen J. Hahn, Yevgeniya Gokun, William M. Andrews Jr., Bethany L. Overfield, Heather Robertson, Amanda Wiggins, Mary Kay Rayens. Radon potential, geologic formations, and lung cancer // Preventive Medicine Reports 2. 2015. Pp 342-346.
27. Геологический атлас России. М. 1:10000000 / Ответств.ред. Смыслов А.А.. Раздел 4. Экологическое состояние геологической среды – М. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1996. – 120 с.
28. Назиров Р. А., Пересыпкин Е. В., Тарасов И. В., Романова А. А. Формирование удельной эффективной активности естественных радионуклидов в

- строительных материалах и изделиях // Материалы Международной научно-практической конференции «Радиоэкология XXI века». 2012 г. С.156-158.
29. Н.П.Лукутцева, О.Ю. Козлов, Г.И. Крупный, М.А. Маслов, Я.Н. Расцветалов, А.А. Янович. Радиационная безопасность строительных материалов и промышленных отходов. / Препринт ИФВЭ 2000 – 28. - Протвино, 2000. – 6 с.
30. Бессонов И.В., Ялунина О.В. Экологические аспекты применения строительных материалов. // Строительные материалы. 2004 г. С. 11-13,
31. Назиров Р.А. Развитие научных основ и методов получения строительных материалов с заданными радиационно-экологическими свойствами. Дисс. ...д-ра техн. наук: 05.23.05; 25.00.36. / Назиров Рашит Анварович. - Красноярск, 2003. - 501 с.
32. Назиров Р. А., Зайцева Н. А., Веде П. Ю. Прогнозирование удельной эффективной активности естественной радиоактивности и эманлирующей способности многокомпонентных строительных материалов // Известия вузов. Строительство. 2018 г. №4. С.42-43.
33. Соколов П.Э., Чернышов П.Д. Исследование влияния обжига карбонатных горных пород на эффективную удельную активность естественных радионуклидов. // Международный научно-исследовательский журнал №01 (55), Часть 4. Январь. Екатеринбург, 2017. С.120-123.
34. П.С. Микляев, Т.Б. Петрова, В.К. Власов, А.М. Афиногенов, О.В. Кирюхин, И.Э. Власова. Влияние свойств глинистых пород на эманирование радона. // Вестник Московского университета. Том 50. №5. Серия 2: Химия. 2009. С. 392-395.
35. Микляев П.С., Петрова Т.Б. Исследования коэффициента эманирования грунтов г. Москвы // АНРИ. 2005. №2. С.30-38.
36. Н.К.Рыжакова, Г.А.Раменская. Методы и результаты определения коэффициентов эманирования глинистых грунтов города Томска. Геоэкология. // Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2012, №2, С.168-176.

37. Раменская Г.А., Шура Л.П. Методы и результаты определения коэффициента эманирования радона в лабораторных условиях // XV Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3 томах. Т.3. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2009. - С.97-99.
38. Н.П. Лукутцева, О.Ю. Козлов, Г.И. Крупный, Я.Н. Расцветалов, А.А. Янович. / К вопросу о коэффициенте эманирования строительных материалов: Препринт ИФВЭ 2000-29. – Протвино, 2000. – 5 с.
39. Соколов П.Э., Чернышев П.Д. Оценка влияния тепловой обработки на коэффициент эманирования радона-222 строительных материалов. // Международный научно-исследовательский журнал. Выпуск № 6(72). Часть 1. Екатеринбург, 2018. С.48-57.
40. Кургуз С.А., Тарасов И.В. Влияние водопоглощения горной породы на эманлирующую способность // Радиоэкология XXI века. Материалы Международной научно-практической конференции. Красноярск: СФУ, 2012. – С.150-156.
41. Гулабянц, Л.А. Плотность потока радона как критерий оценки радоноопасности / Л.А. Гулабянц, Б.Ю. Заболотский // АНРИ. 2004. №3. С. 16-20.
42. Микляев П.С. , Петрова Т.Б. Влияние влажности на эманирование песчано-глинистых пород // АНРИ. - 2009. - №1. - С. 53-57.
43. Старик И.Е. Вопросы геохимии урана и радия // Академику В.И. Вернадскому к пятидесятилетию научной и педагогической деятельности / И.Е. Старик. – М., Изд-во АН СССР, 1936. С. 445-462.
- 44 .Старик И.Е. Эманлирующая способность минералов / Старик И.Е., Меликова О.С. // Тр. Радиового института. - 1957. - Том 5. №2. - С. 184-202.
45. Старик И.Е. Факторы, влияющие на эманлирующую способность искусственных солей и минералов / Старик И.Е., Меликова О.С. // Радиохимия.- 1959. - Том 1. №5. - С. 196-203.
46. Кургуз С.А., Тарасов И.В. Влияние водопоглощения горной породы на эманлирующую способность // Радиоэкология XXI века. Материалы Между-

народной научно-практической конференции. Красноярск: СФУ, 2012. – С.150-156.

47. Hongbing Sun, David J. Furbish. Moisture content effect on radon emanation in porous media // Journal of Contaminant Hydrology. – 1994. – Vol.18. Pp 239-255.

48. Nabil M. Hassan, Tetsuo Ishikawa, Masahiro Hosoda, Kazuki Iwaoka, Atsuyuki Sorimachi, Sarata K. Sahoo, Mirosław Janik, Chutima Kranrod, Hidenori Yonehara, Masahiro Fukushi, Shinji Tokonami. The effect of water content on the radon emanation coefficient for some building materials used in Japan // Radiation Measurements. - 2011. - №46. - Pp 232-237.

49. Cosma, C., Dancea, F., Jurcut, T., Ristoiu, D. Determination of ^{222}Rn emanation fraction and diffusion coefficient in concrete using accumulation chambers and the influence of humidity and radium distribution // Applied Radiation and Isotopes. - 2001. - №54. - Pp 467–473.

50. СП 50.13330-2012 «Тепловая защита зданий». Введ. с 01.01.2012г. М.:Минрегион России, 2012. 95 с.

51. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. Введ. с 01.01.2013г. – М.: Стандартинформ, 2013.

52. Черныш Н.Д., В.Н. Тарасенко. Строительная физика: Учебное пособие/ Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. 238 с.

53. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гаммаспектрометра с программным обеспечением «Прогресс». – Менделеево, ВНИИФТРИ, 2005. – 23 с.

54. Методика измерения объемной активности радона в воздухе. AlphaGUARD Mod. PQ2000. Менделеево, ВНИИФТРИ. 2009.

55. Р.А.Назирова, С.А. Кургуз, В.В. Коваленко, Е.В. Пересыпкин. Классификация способов и технических решений радоновой защиты зданий и сооружений: методические указания к курсу для студентов строительных специальностей. –Красноярск: КрасГАСА, 2006. 34 с.

56. Р.А. Назиров, С.А. Кургуз, В.В. Коваленко, Е.В. Пересыпкин. Общие критерии выбора технических решений радоновой защиты зданий и сооружений: методические указания к курсу для студентов строительных специальностей. – Красноярск: КрасГАСА, 2006. 24 с.

57. СП 131.13330.2018. «Строительная климатология». Введ. с 29.05.2019г. – М.: Стандартиформ, 2019. 109 с.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт
институт

Проектирование зданий и экспертиза недвижимости
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



подпись

Р.А. Назиров

инициалы, фамилия

« _____ » _____ 20 ____ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Формирование естественного радиационного фона
в энергоэффективных зданиях»

тема

08.04.01 «Строительство»

код и наименование направления

08.04.01.04 «Проектирование зданий. Энерго- и ресурсосбережение»

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель



подпись, дата


Д.т.н., профессор

должность, ученая степень

Р.А. Назиров

инициалы, фамилия

Выпускник

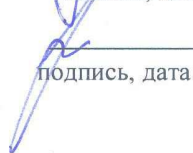


подпись, дата

Е.Д. Гуненко

инициалы, фамилия

Рецензент



подпись, дата

к. т. н.

должность, ученая степень

Е.Ф. Пригоров

инициалы, фамилия

Красноярск 2020