

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

«Прогнозирование концентрации радона в проектируемых жилых бетонных
зданиях методом компьютерного моделирования»

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

доцент, канд. техн. наук

должность, ученая степень

И.В. Тарасов

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

Н.А. Зайцева

инициалы, фамилия

Рецензент

подпись, дата

доцент, канд. техн. наук

должность, ученая степень

Е.Г. Плюсунов

инициалы, фамилия

Красноярск 2018

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 Зайцевой Наталье Александровне

фамилия, имя, отчество

Группа СФ 16-04М 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 «Прогнозирование концентрации радона в проектируемых жилых бетонных зданиях методом компьютерного моделирования»

Утверждена приказом по университету № 4947/с от 6 апреля 2018 г.

Руководитель магистерской диссертации И.В. Тарасов, доцент кафедры

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и

ПЗиЭН, канд. техн. наук, ПГС

место работы

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

Перечень разделов магистерской диссертации:

- Введение;
- Глава 1. Состояние вопроса и выбор основного направления исследования;
- Глава 2. Оборудование и характеристика материалов, используемых в работе;
- Глава 3. Исследование удельной эффективной активности естественной радиоактивности и эманлирующей способности многокомпонентных строительных материалов;
- Глава 4. Расчет вероятной концентрации радона и моделирование процесса диффузии в изолированном подвальном помещении при заданной удельной активности радия и коэффициента эманирования бетона.
- Заключение;
- Приложение А. Прогнозирование удельной эффективной активности естественной радиоактивности и эманлирующей способности многокомпонентных строительных материалов;
- Приложение Б. Проблема радона, как основа на пути к обеспечению радиационной безопасности населения в России.

- Перечень графического материала презентация

Руководитель ВКР

подпись

И.В. Тарасов

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

подпись

Н.А. Зайцева

инициалы и фамилия

« ____ » _____ 20__ г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1. Состояние вопроса и выбор основного направления 10	10
исследования.....	10
1.1 Основные законы радиационной безопасности населения.....	10
Российской Федерации.....	10
1.2 Теоретические основы и история развития радиационного.....	12
контроля в России.....	12
1.3 Вклад различных источников ионизирующего излучения в облучение	
населения	13
1.3.1 Естественные источники радиации.....	15
1.3.2 Техногенные источники радиации.....	16
1.4 Характеристика радона, как основного источника радиационной	
опасности для населения.....	18
1.5 Принципы и особенности формирования радиационного фона в жилых	
помещениях	21
1.6 Строительные материалы, как источник естественного излучения	23
ГЛАВА 2. Оборудование и характеристика материалов, используемых в работе.	
.....	26
2.1 Отбор проб для анализа радиоактивных измерений.....	26
2.2 Определение удельной активности гамма - спектрометрическим способом	
на сцинтилляционном спектрометрическом комплексе.....	27
«Прогресс».....	27
2.3 Измерение объемной активности на многопараметрическом радоновом	
мониторе-дозиметре «ALPHAGUARD PQ 2000»	29

ГЛАВА 3. Исследование удельной эффективной активности естественной радиоактивности и эманлирующей способности многокомпонентных строительных материалов.	32
3.1 Проведение инструментальных испытаний	33
3.2 Экспериментальное определение удельной активности материалов и удельной эффективной активности ЕРН	36
3.3 Экспериментальное определение коэффициентов эманирования и эманлирующей способности материалов	39
ГЛАВА 4. Расчет вероятной концентрации радона и моделирование процесса диффузии в изолированном подвальном помещении при заданной удельной активности радия и коэффициента эманирования бетона.	46
4.1 Описание пакета программ COMSOL Multiphysics	46
4.2 Математическая модель процесса диффузии	48
4.3 Исходные данные и методика компьютерного моделирования процесса диффузии.....	49
4.4 Расчет скорости и интенсивности диффузионного поступления радона в здание подвального помещения	52
4.5 Компьютерное исследование процесса диффузии радона.	54
4.5.1 Модель плотности потока радона в изолированном подвальном помещении проектируемого жилого бетонного здания	54
4.5.2 Модель концентрации радона в изолированном подвальном помещении проектируемого жилого бетонного здания	58
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	63
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	65
ПРИЛОЖЕНИЕ А	69
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	85

ВВЕДЕНИЕ

В помещениях человек подвергается воздействию как внешнего гамма-излучения, обусловленного содержанием природных радионуклидов в строительных материалах, так и внутреннего облучения, вызываемого попаданием радионуклидов на наружные покровы тела и внутрь организма при вдыхании радиоактивного газа преимущественно радона и его дочерних продуктов распада (ДПР), содержащихся в воздухе помещений и в воде.

Обеспечение радиационной безопасности населения обуславливает необходимость выявления, изучения, оценки естественной радиоактивности строительных материалов и источников поступления радиоактивного газа радона в воздух жилого помещения.

Тематика исследования особенно актуальна для регионов с повышенным содержанием естественной радиоактивности строительного сырья и высоким содержанием радона в грунте.

По результатам отечественных и зарубежных исследований, человек проводит внутри помещений большую часть своей жизни, по некоторым данным, эти значения варьируются от 60 до 90 %. И, находясь в искусственной среде малопрветриваемого жилого помещения, человек подвергается облучению за счет повышенного содержания естественных радионуклидов (ЕРН) и распада дочерних продуктов радона (ДПР), накапливающихся в воздухе помещений. Радон – это природный радиоактивный газ, образующийся в результате распада радия-226 в ряду естественного урана. Вдыхание воздуха с высокой активностью радона и его ДПР приводит к увеличению риска и частоты заболевания раком легких. По оценке службы здравоохранения США у населения США зарегистрировано около 20 000 случаев заболевания раком легких с летальным исходом, вызванного воздействием радона. Ущерб для здоровья населения, по её оценке, «возможно в 10 раз превышает ущерб от загрязнения воздуха вне помещения».

Анализ литературных источников показал, что уровень концентрации радона может изменяться в широком диапазоне в зависимости от различных природных и техногенных факторов. В России значение эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) в воздухе, в соответствии с нормами радиационной безопасности, не должно превышать 200 Бк/м³ для эксплуатируемых жилых и общественных зданий. При проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения должно быть предусмотрено, чтобы ЭРОА в воздухе помещений не превышала 100 Бк/м³.

В современной нормативной документации доза облучения от естественных источников ионизирующего облучения не нормируется. Ограничение облучения населения достигается путем установления системы ограничений на облучение населения от отдельных природных источников излучения.

Предмет исследования – формирование естественной радиоактивности многокомпонентных строительных материалов и процесс эманирования - выделение радиоактивных атомов радона из строительных материалов в воздушную среду жилого помещения.

Цель исследования. Развитие научных основ и расчетных методов оценки поступления и скорости выхода радона в воздух жилых помещений

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Произвести анализ зарубежных и отечественных научных исследований по заданной тематике исследования;
2. Произвести спектрометрические замеры по содержанию радионуклидов и удельной активности Радия 226 в исходном строительном сырье и в готовых бетонных образцах;
3. Определить объемную активность радона и произвести эманиционные измерения испытуемых образцов;

4. Произвести численное моделирование процесса диффузии радона для подвального помещения на основе эманационных измерений, с учетом скорости поступления радона в поровое пространство бетона
5. Рассчитать вероятную концентрацию радона в воздухе проектируемого подвального помещения;
6. Установить закономерности распределения концентрации радона в грунте в зависимости от ширины и глубины здания.

ГЛАВА 1. Состояние вопроса и выбор основного направления исследования.

1.1 Основные законы радиационной безопасности населения Российской Федерации.

В настоящее время существуют два Федеральных закона Российской Федерации - «О радиационной безопасности населения» № 3-ФЗ от 09.01.96 г. и «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» № 52-ФЗ от 30.03.99г., которые регламентируют соблюдение основных норм радиационной безопасности и необходимость проведения радиологических исследований. [6, фз]

К основным нормативным документам относят:

- Санитарные правила и нормы СанПин 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». Регламентирует требования Федерального закона «О радиационной безопасности населения» данные нормы применяются для обеспечения безопасности человека во всех условиях воздействия на него ионизирующего излучения искусственного или природного происхождения, причем никакие другие нормативные документы не должны противоречить требованиям этих норм. [4]

- 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. [5]

- 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» обеспечивают единые требования к организации и проведению радиационного контроля и гигиенической оценки по показателям радиационной безопасности земельных участков, отво-

димых под строительство жилых, общественных и производственных зданий и сооружений. [30]

- ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов» и распространяется на неорганические сыпучие строительные материалы (щебень, гравий, песок, цемент, гипс и др.) и строительные изделия (плиты облицовочные, декоративные и другие изделия из природного камня, кирпич и камни стеновые), а также на отходы промышленного производства, используемые непосредственно в качестве строительных материалов или как сырье для их производства, и устанавливает методы определения удельной эффективной активности естественных радионуклидов для оценки строительных материалов и изделий. [32]

Требования, нормативы и правила, установленные НРБ-99/2009, ОС-ПОРБ-99/2010, ГОСТ 30108-94 и МУ 2.6.1.2398-08 являются обязательными для всех юридических лиц, в результате деятельности которых возможно облучение людей. Это касается также и администраций субъектов Российской Федерации, местных органов власти, граждан Российской Федерации, иностранных граждан и лиц без гражданства, проживающих на территории Российской Федерации.

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 для разных регионов, критерии для принятия решений и требования, предъявляемые к проектированию, строительству, приемке зданий и отводу земельных участков под застройку.

Существует также множество дополнительных норм и стандартов, применяемых в различных отраслях, но они могут либо дублировать, либо при соответствующем обосновании ужесточать существующие нормы.

1.2 Теоретические основы и история развития радиационного контроля в России

Впервые общее состояние проблемы радона в жилых помещениях было озвучено на XII региональном конгрессе Международной ассоциации по радиационной защите, проводившемся в 1985 году в Нидерландах, где состояние проблемы было охарактеризовано как находящееся на этапе перехода от осознания её значимости к разработке способов решения. И с начала 90-х годов в Скандинавских странах, США, Канаде, Великобритании и Германии многие разработки и исследования велись на повышение качества жизни и благосостояния страны в рамках государственных и национальных программ, а результаты этих исследований сообщаются и по сей день научным комитетом по действию атомной радиации (НКДАР ООН) и Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ).

В России систематические исследования естественной радиоактивности строительной продукции и материалов были начаты только в 70-е годы в Ленинградском институте радиационной гигиены. Исследования природной радиоактивности строительных материалов фактически начались еще в конце 1960-х гг. по инициативе и под руководством Э.М. Крисюка, усилиями которого в России создана школа радиологов-специалистов в области физики и радиационной гигиены природных радионуклидов. Первыми были работы по радиационной оценке возможности использования в качестве строительных материалов фосфорных шлаков, образующихся при электротермической обработке руд месторождения Кара-Тау в Казахстане и хвостовых песков Тырнаузского комбината в Кабардино-Балкарии. В обоих случаях содержание природных радионуклидов в исследованных материалах оказалось повышенным. [1] Практическим результатом его работы является документ № 43-10/796 «Ограничение облучения населения от природных источников ионизирующего излучения. Временные критерии для организации контроля и принятия решений», введённый в действие в декабре 1990 г. в качестве республиканских санитарных правил. [2]

Но радиационные исследования в СССР проводились и ранее. Отечественным основоположником радиогеологии считают профессора и биогеохимии Владимира Ивановича Вернадского. Он один из первых ученых, кто понял важность изучения радиоактивных процессов для всех сторон общества. Ход исследований радиоактивных месторождений был отражен в «Трудах Радиевой экспедиции на Урал», также он указывал на необходимость радиологических исследований и в южных регионах, и считал, что для успешной и продуктивной работы должны быть организованы постоянные исследовательские станции. Также несравненно большой вклад в развитие радиогеологии внесли А.Е. Ферсман, В.Г. Хлопин, А.П. Виноградов, А.П. Кириков и другие советские ученые.

1.3 Вклад различных источников ионизирующего излучения в облучение населения

В настоящее время основная часть радиационного фона окружающей среды формируется за счёт естественных источников космического и земного происхождения. Дополнительный радиационный фон создают искусственные радионуклиды, попадающие в биосферу в результате жизнедеятельности человека. Естественными радионуклидами (ЕРН) принято считать вещества, которые образовались и постоянно вновь образуются без участия человека. Таким образом, различают естественный и искусственный радиационный фон.

Облучение человека от естественных источников ионизирующего излучения происходит двумя способами. Существует внешнее и внутреннее облучение от естественных источников ионизирующего излучения. Внешнему облучению подвергаются лишь тогда, когда радиоактивные вещества находятся вне организма и облучают его снаружи; а внутреннее, когда они попадают в организм с воздухом, пищей или водой, и облучают организм внутри. [29]

Средние годовые значения эффективных эквивалентных доз облучения сведены в таблице 1. [8]:

Таблица 1 - Средние годовые эффективные эквивалентные дозы облучения от естественных и техногенных источников радиации. [8]:

Источники радиации	Годовая эффективная доза, мЗв
Естественные	2
Земного происхождения, внутреннее облучение	1,325
Земного происхождения, внешнее облучение	0,35
Космическое, внешнее облучение	0,3
Космическое, внутреннее облучение	0,015
Техногенные	0,421
Источники, использующиеся в медицине	0,4
Радиоактивные осадки	0,02
Атомная энергетика	0,001

В помещениях человек подвергается воздействию как внешнего гамма-излучения, обусловленного содержанием природных радионуклидов в строительных материалах, так и внутреннего облучения, вызываемого попаданием радионуклидов на наружные покровы тела и внутрь организма при вдыхании радиоактивных газов (преимущественно радона и его ДПР), содержащихся в воздухе помещений. [29]

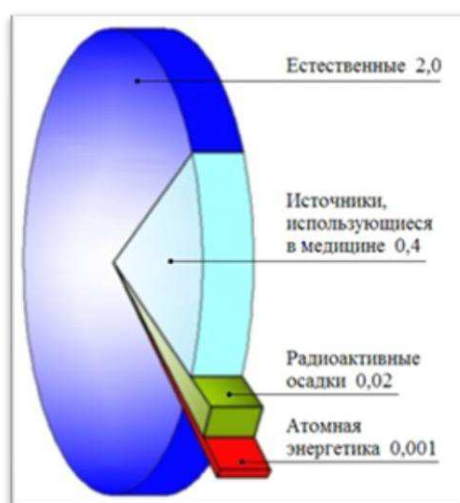


Рисунок 1. Источники радиации [29]



Рисунок 2. Естественные источники радиации [29]

На рисунках 1 и 2 цифры указывают величину средних годовых эффективных эквивалентных доз облучения в мЗв.

1.3.1 Естественные источники радиации

Самое большое облучение происходит за счет естественных источников радиации именно земного происхождения. Основными естественными радионуклидами, характерными для земной коры, являются калий ^{40}K , рубидий ^{87}Rb , и члены двух радиоактивных семейств, берущих начало от урана ^{238}U и тория ^{232}Th . Уровень земной радиации изменяется для различных мест земного шара и зависит от концентрации радионуклидов в том или ином участке земной коры, но в местах проживания основной массы населения они примерно одного порядка.

Однако существуют области, где уровень естественной радиации значительно превышает средние значения. Например, эквивалентная доза, получаемая двенадцатитысячным населением курортного города Гуапари (Бразилия), достигает 175 мЗв/год, вблизи города Посус – ди - Калдас эта доза в 800 раз превосходит средний уровень и достигает 250 мЗв/год. Или на юго-западе Индии (штаты Керала и Мадрас) расположена коса длиной около 200 км, покрытая монацитовыми песками с большим содержанием тория. Население этой

территории получают эффективную эквивалентную дозу в 50 раз больше средней годовой дозы внешнего облучения от земных источников. В Иране много ручьев с большим содержанием радия, уровни радиации достигают 400 мЗв/год. Также известны места с аномально высоким уровнем ионизирующего излучения и во Франции, Нигерии, России, на Мадагаскаре [3].

Значительным источником внешнего естественного облучения населения является космическое излучение. Величина дозы космического излучения зависит от различных внешних факторов, таких как широта и высота над уровнем моря. Например, Северный и Южный полюсы получают больше радиации, чем экваториальные области. В значительной степени уровень облучения растет с высотой. Люди, живущие на уровне моря, получают в среднем из-за космических лучей эффективную эквивалентную дозу около 300 мЗв/год; для людей живущих выше 2000м над уровнем моря, эта величина в несколько раз больше [7].

При полетах на авиатранспорте мощность дозы облучения пассажиров в большей степени меняется в зависимости от высоты полета над уровнем моря и в меньшей степени от широты. Так, например, при подъеме самолета с 4 км до 12 км (максимальная высота полета транспортных авиалайнеров) доза космического излучения возрастает примерно в 25 раз. С дальнейшим увеличением высоты над уровнем моря доза космического излучения продолжает увеличиваться и на высоте 20 км достигает 13 мкЗв/ч. [11,12]

1.3.2 Техногенные источники радиации

В настоящее время основной вклад в дозу, получаемую человеком от техногенных источников радиации, вносят медицинские процедуры [8]. Медицинская радиология основана на широком применении различных источников ионизирующих излучений в различных технологиях диагностики и лечения. При этом воздействию излучения подвергаются не только пациенты, но и персонал, отдельно взятое население и в некоторых ситуациях – окружающая среда [14].

И поэтому оценка состояния радиационной безопасности является неотъемлемым условием деятельности с использованием источников ионизирующего излучения [15].

На территории России крупные аварии случались довольно часто, например, при аварии на Южном Урале в 1957 г. произошел тепловой взрыв хранилища радиоактивных отходов, и в атмосферу поступили радионуклиды с суммарной активностью 74 ПБк. Технологический сброс радиоактивных отходов предприятия «Маяк» на Южном Урале в р. Теча в 1950 г. составил 102 ПБк. Так при аварии на Чернобыльской атомной электростанции из разрушенного реактора было выброшено 1850 ПБк. Распространение радионуклидов приняло обще планетные масштабы [16].

В таблице 2 представлены данные для городов России с повышенными дозами облучения населения [17]. Стоит отметить, что основной вклад в суммарную дозу в этих регионах дают природные источники облучения.

Таблица 2 - Соотношения доз облучения от различных источников облучения в регионах [17].

Республика РФ	Средние дозы, мЗв/год				
	ЭИ	ТФ	ПИ	МИ	Всего
1	2	3	4	5	6
Республика Алтай	0,0007	0,005	9,9200	0,56	10,4857
Еврейская ОА	0,0002	0,005	9,3900	0,72	10,1152
Читинская область	0,0005	0,005	6,4000	1,04	7,4455
Иркутская область	0,0010	0,005	5,7300	0,73	6,466
Ставропольский край	0,0010	0,005	5,8800	0,62	6,506
Ростовская область	0,0011	0,005	5,2500	0,47	5,7261
Липецкая область	0,0021	0,007	4,9600	0,62	5,5891
Алтайский край	0,0005	0,005	4,3800	1,14	5,5255

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
Республика Тува	0,0003	0,005	4,7200	0,73	5,4553
Усть-Ордынский Бурятский АО	0,0004	0,005	4,9400	0,60	5,5454
Республика Бурятия	0,0005	0,005	5,0400	0,23	5,2755
Чеченская Республика	0,0000	0,005	4,5700	0,76	5,335
Пермский край	0,0019	0,005	3,6800	1,61	5,2969
Кабардино-Балкарская Рес- публика	0,0001	0,005	4,6900	0,49	5,1851
Ивановская область	0,0002	0,005	4,3900	0,74	5,1352
Калужская область	0,0046	0,018	4,2800	0,78	5,0826
Оренбургская область	0,0009	0,005	4,1300	0,95	5,0859
Свердловская область	0,0028	0,005	4,0100	1,08	5,0978
Агинский Бурятский АО	0,0003	0,005	4,1300	0,93	5,0653
Красноярский край	0,0004	0,005	3,3500	0,57	3,9254

где ЭИ - эксплуатация техногенных источников; ТФ - техногенный фон; ПИ - природные источники облучения; МИ - медицинские источники облучения.

1.4 Характеристика радона, как основного источника радиационной опасности для населения

В последние годы стало известно, что основную радиационную опасность для населения представляет невидимый, не имеющий вкуса и запаха радиоактивный газ радон [1, 2, 4, 15, 16, 17, 18] .

При нормальных условиях радон – бесцветный однородный газ, малорастворимый в воде, легко диффундирует в различных средах и не вступает в химические реакции с другими элементами и веществами. Попав в замкнутое

пространство, он практически мгновенно равномерно распределяется в его объеме. [Тарасов, 19] Радон – самый тяжелый элемент нулевой группы периодической системы. Источник получения естественного изотопа ^{222}Rn является ^{226}Ra [18].

В настоящее время известно 39 изотопа и ядерных изомера радона с массовыми числами от 193 до 231 и периодами полураспада от 0,3 нс до 3,8 сут. Из них актинон – ^{219}Rn , торон – ^{220}Rn и радон – ^{222}Rn являются членами естественных радиационных рядов и встречаются в природе. Природные изотопы: Rn-218 ($T_{1/2} = 0,035$ с); Rn-219, или актинон ($T_{1/2} = 3,92$ с); Rn-220, или торон ($T_{1/2} = 54,5$ с); Rn-222, или собственно радон ($T_{1/2} = 3,825$ сут). Все изотопы радона радиоактивны. Наиболее стабильным является изотоп ^{222}Rn , являющийся дочерним продуктом распада изотопа радия ^{226}Ra . Изотоп ^{222}Rn претерпевает α -распад с периодом полураспада 3,823 дня [18,19]. Изотопы радона могут быть растворимы в воде и других жидкостях. Коэффициент растворимости в воде при 15°C находится в пределах 0,25 – 0,30.

Таблица 3 - Физические свойства радона [18,19].

Порядковый номер элемента	86
Относительная атомная масса	222,018
Содержание в земной коре, %	$6,2 \cdot 10^{-16}$
Температура плавления, $^\circ\text{C}$	-71,0
Температура кипения, $^\circ\text{C}$	-62,0
Плотность при нормальных условиях, г/л	9,96
Степень окисления	0
Потенциал ионизации, эВ	10,6
Атомный радиус, нм	0,182
Коэффициент диффузии в воздухе, cm^2/c	0,105
Объем 1 Ки радона-222, mm^3	0,66

В природе, согласно текущей оценке НКДР ООН, радон вместе со своими дочерними продуктами радиоактивного распада обеспечивает примерно за $\frac{3}{4}$ годовой индивидуальной эффективной дозы облучения, полученной населением от земных источников радиации. Большую часть этой дозы человек получает от внутреннего облучения и радионуклидов, попадающих в его организм вместе с вдыхаемым воздухом, особенно в непроветриваемых помещениях. [8].

По другим статистическим данным [7] почти половину годовой индивидуальной эффективной дозы облучения от земных радиационных источников человек получает от радиоактивных газов радона и торона.

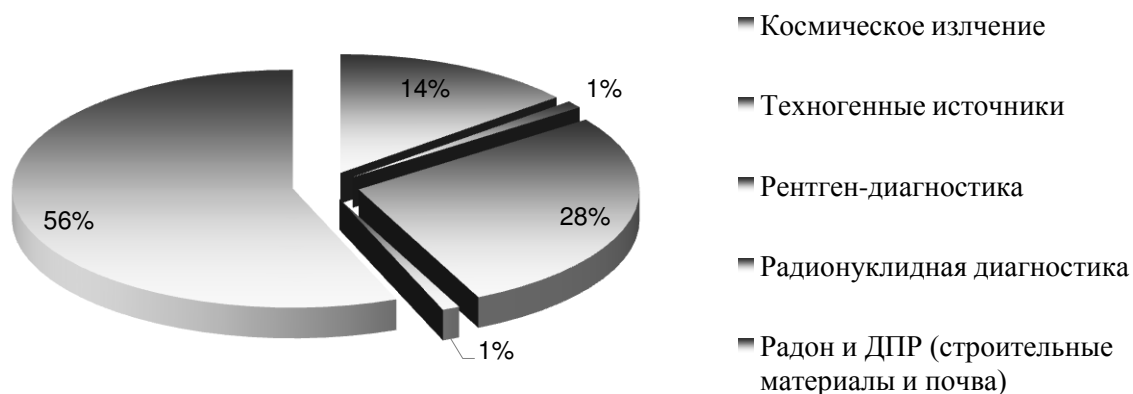


Рисунок 3 - Относительный вклад различных составляющих естественно-го радиоактивного фона в облучение населения Российской Федерации [28].

Для оценки воздуха помещений используют единицу, которую называют эквивалентной равновесной объёмной активностью ($\text{ЭРОА}_{\text{Rn}} + 4,6 \cdot \text{ЭРОА}_{\text{Tn}}$) изотопов радона и торона. Ее предельно-допустимое значение для воздуха урановых предприятий установлено равным 1240 Бк/м^3 , для производственных помещений – 310 Бк/м^3 , для эксплуатируемых жилых и общественных зданий – 200 Бк/м^3 . При больших значениях объёмной активности должны проводиться защитные мероприятия, направленные на снижение поступления радона в воздух помещений и улучшение вентиляции помещений.

При проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения должно быть предусмотрено, чтобы ЭРОА в воздухе помещений не превышала 100 Бк/м^3 [21, 24, 25].

$$(\text{ЭРОА})_{\text{Rn}} = 0,10A_{\text{RaA}} + 0,52A_{\text{RaB}} + 0,38 A_{\text{RaC}}, \quad (1)$$

где A_{RaA} , A_{RaB} и A_{RaC} – объёмные активности ^{218}Po , ^{214}Pb и ^{214}Bi , Бк/м^3 , соответственно.

Допускается проводить оценку ЭРОА_{Rn} по результатам измерений объёмной активности радона (A_{Rn}). В этом случае для пересчета измеренных значений F_{Rn} в значение ЭРОА_{Rn} используется коэффициент F_{Rn} , характеризующий сдвиг радиоактивного равновесия между радоном и его дочерними продуктами в воздухе.

$$\text{ЭРОА}_{\text{Rn}} = F_{\text{Rn}} \cdot A_{\text{Rn}}. \quad (2)$$

Значения F_{Rn} определяют экспериментальным путем по результатам одновременных измерений A_{Rn} и ЭРОА_{Rn} . В расчетах по формуле (2) используют средние значения F_{Rn} , характерные для данного региона, периода года и типа здания. При отсутствии экспериментальных данных о значении F_{Rn} его принимают равным 0,5 [24, 26]

1.5 Принципы и особенности формирования радиационного фона в жилых помещениях

В России жилищный фонд представлен преимущественно многоэтажными зданиями из кирпича и железобетона. Некоторые отечественные публикации и работы, посвященные измерениям радона в воздухе помещений, указывают на существенный вклад этих строительных материалов в формирование уровня концентрации радона, [2, 28, 29], но чаще всего основным источником

поступления радона в здание является его грунтовое основание [2, 18, 27,28,29]. Основные источники радона и пути его проникновения в здание представлены на видоизмененной схеме, приведенной в работе на рисунке 4.

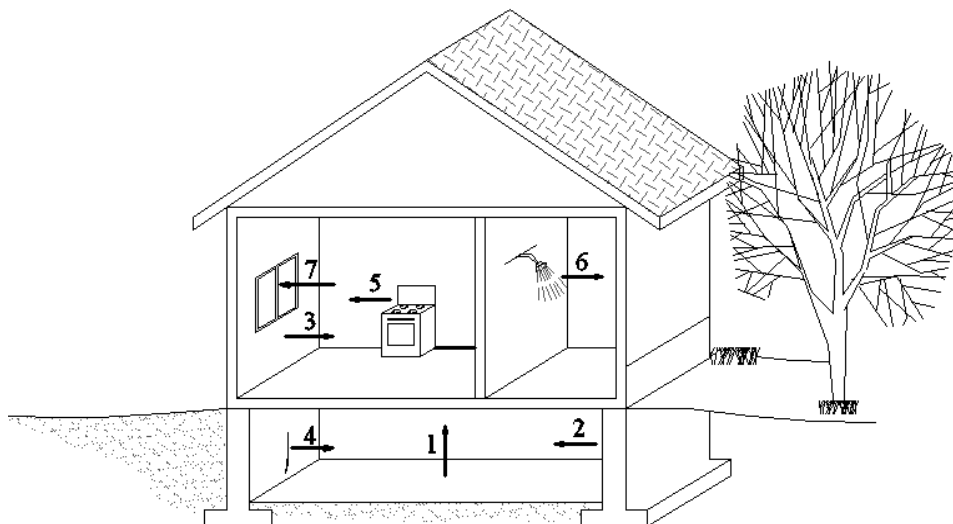


Рисунок 4 - Основные источники и пути проникновения радона в здания: 1 - грунт под зданием; 2,3 – строительные материалы, применяемые при устройстве фундаментов и стен здания; 4 – трещины в конструкциях; 5 – система газоснабжения; 6 – система водоснабжения; 7 – выход радона [29]

Концентрации и потоки радона при поступлении его в закрытое помещение крайне неравномерны и зависят от различных факторов. Например, таких как, геологогеофизических характеристик природной среды, конструкции зданий, строительных материалов и качества работы вентиляционных систем [21].

Вследствие ограниченного воздухообмена внутри помещения формируется повышенная концентрация радона, которая может в значительной степени превышать показатели наружного воздуха, так в зонах с умеренным климатом концентрация радона в закрытых помещениях в среднем примерно в восемь раз выше, чем в наружном воздухе [8]. В таблице 4 представлены усредненные показатели мощностей и основных источников поступления радона в жилые помещения [7].

Таблица 4 - Сопоставление мощностей различных источников радона в типичном доме [7].

Источник радона	Поступление, кБк/сут
Грунт под зданием и строительные материалы, используемые в строительстве	60
Наружный воздух	10
Вода	4
Природный газ	3

Радиоактивные эманации и естественные радионуклиды, содержащиеся в грунте под зданием, и сырье для изготовления строительных материалов, в основном, за счет изменения геометрии облучения и ограниченного воздухообмена создают повышенный радиационный фон в помещении. Принимая во внимание, что в среднем около 80% своего времени население проводит в помещениях зданий, очевидно, что ведущая роль в решении задачи снижения облучения принадлежит строительной отрасли [29].

1.6 Строительные материалы, как источник естественного излучения

Большинство строительных материалов непосредственно являются природными компонентами экосистемы и имеют свои специфические радиационные свойства. Наиболее опасными в этом отношении могут быть строительные материалы из природного камня и материалы на основе минеральных вяжущих [2].

С введением ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов» и Санитарных Правил 2.6.1.2800-10 «Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет источников ионизирующего излучения» в обязательном порядке проводятся исследования образцов строительных

материалов на удельную эффективную активность естественных радионуклидов. Радий-226, Торий-232 и Калий-40 могут создавать в помещении повышенный радиационный фон, складывающийся из эманаций радиоактивного газа радона и гамма-излучения. [13]

Критерием оценки является удельная эффективная активность, по которой устанавливается принадлежность материала к 1, 2 или 3 классу и определяются возможные области его использования. Эти характеристики указываются в гигиенических сертификатах на строительные материалы.

Для строительных работ радиационная безопасность регламентируется для щебня, гравия из плотных горных пород и песка, в таблице 5, в котором устанавливаются требования для этапа производства из них строительных материалов на основе минеральных вяжущих — бетона, строительного раствора, в соответствии с областями их применения [32].

Таблица 6 – Радиационно - гигиеническая оценка и требования к материалам по ГОСТ при их производстве [32]

Вид строительного материала	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Аэфф	Класс безопасности	Установленная область применения
щебень, гравий, песок	до 370 Бк/кг	1	во вновь строящихся жилых и общественных зданиях
щебень, гравий, песок	свыше 370 до 740 Бк/кг	2	для дорожного строительства в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных зданий и сооружений
щебень, гравий, песок	свыше 740 до 1350 Бк/кг	3	в дорожном строительстве вне населенных пунктов

Принимая во внимание, что в среднем около 80% своего времени население проводит в помещениях зданий, очевидно, что ведущая роль в решении задачи снижения облучения принадлежит строительной отрасли [29]. Таким образом, разработка составов экологически чистых по радиационному фактору материалов и радонозащитных технологий является современной актуальной задачей. [29]

ГЛАВА 2. Оборудование и характеристика материалов, используемых в работе.

В рамках работы главным образом использовались поэтапно следующие виды инструментальных измерений:

- спектрометрические (определение содержания материнского Ra-226 в стандартном образце бетона или строительного раствора);
- эманационные (измерение уровня радона, выделившегося из стандартного образца материала, помещенного в герметичную ёмкость).

Соответственно их реализация потребовала привлечения различных типов измерительных приборов, принципы работы которых отличны друг от друга.

Все эксперименты выполнены в лаборатории радиационного контроля Сибирского федерального университета. Концентрации ЕРН в песке, гравии и цементе определяли в их товарном виде. Пробы бетона через 28 суток твердения измельчали до максимальной крупности гравия. Все образцы до измерения выдерживались в течение 15 суток в сосудах Маринелли. Измерения проводили на стационарном гамма – бета - спектрометре МКС-АТ1315 производства фирмы АТОМТЕХ. Определение значений коэффициентов эманирования радона из строительных материалов и сырья в нашей работе производилось с помощью радиометра «AlphaGUARD Mod. PQ2000». Время экспозиции для каждого образца составляло не менее 12-14 дней. Прибор фиксировал в автоматическом режиме концентрацию радона в воздухе, давление, температуру и влажность каждые 10 мин.

2.1 Отбор проб для анализа радиоактивных измерений

Отбор проб является начальным этапом исследований. Отобранные пробы должны быть представительными по отношению к обследуемым партиям

сырья или продукции согласно требованиям и условиям ГОСТ 10181.3-81 «Смеси бетонные. Методы определения пористости».

Для определения содержания основных естественных радионуклидов в лабораторию поступают отобранные пробы массой не менее 1 кг. Пробы высушивают при температуре не более 400°C. Затем пробы дробят с помощью дробилки до размера не более 0,5-1 мм и тщательно перемешивают для достижения равномерного распределения активности по объёму пробы.

Подготовленную таким образом пробу помещают в стандартную измерительную кювету и закупоривают крышкой. Объём заполнения кюветы должен соответствовать номинальному значению с погрешностью не более $\pm 10\%$. Масса пробы определяется взвешиванием с погрешностью не более $\pm 2\%$.

Затем пробу надёжно герметизируют, например, с помощью поливинилацетатного клея ПВА. Выдержка пробы перед измерением не менее двух недель гарантирует установление радиоактивного равновесия между радоном и его дочерними продуктами распада.

Приготовленная таким образом проба готова к последующим измерениям.

2.2 Определение удельной активности гамма - спектрометрическим способом на сцинтилляционном спектрометрическом комплексе «Прогресс»

Удельную активность естественных радионуклидов во всех испытуемых образцах определяли при помощи сцинтилляционном гамма -спектрометр «Прогресс», рисунок 5. Гамма-спектрометр предназначен для для определения удельной активности ЕРН – К-40, Ra-226 и Th-232 в пробах минеральных строительных материалов. [36]

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 $Nal(Tl)$, 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». [39]

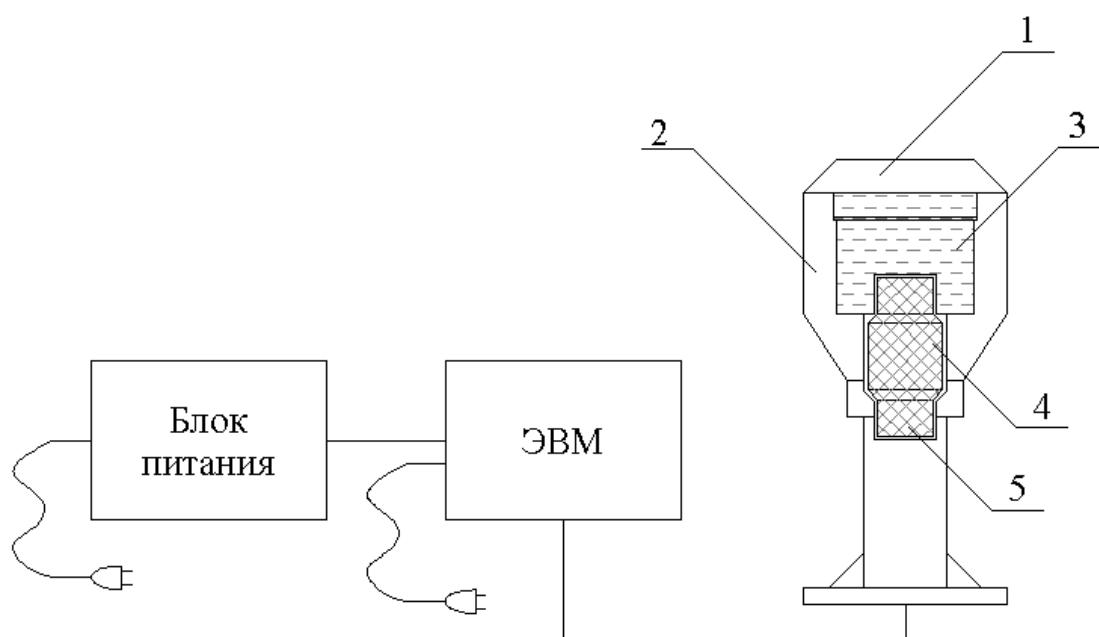


Рисунок 6 - Принципиальная схема гамма - спектрометра: 1 – Створка откатная; 2 – свинцовый корпус; 3 – сосуд Маринелли; 4 – блок детектирования; 5 – фотоэлектронный умножитель [39]



Рисунок 5 - Комплект оборудования, необходимого для проведения спектрометрических измерений.

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

2.3 Измерение объемной активности на многопараметрическом радонном мониторе-дозиметре «ALPHAGUARD PQ 2000»

Для измерения объемной активности радона использовали следующее оборудование: профессиональный радон-монитор AlphaGUARD, эманационный контейнер объемом 50 литров и персональный компьютер, обозначены на рисунке 7 и 8.

Радон-монитор AlphaGUARD PQ2000 является центральным блоком портативной компактной измерительной системы для определения объемной ак-

тивности радона и его ДПР, мощности дозы гамма-излучения, а также ряда климатических параметров.

AlphaGUARD PQ2000 отличается высокой точностью регистрации радона, быстрым откликом на изменение его концентрации. Прибор обеспечивает надежное проведение измерений при экспериментально высокой влажности и является нечувствительным к вибрациям и ударам. [39]

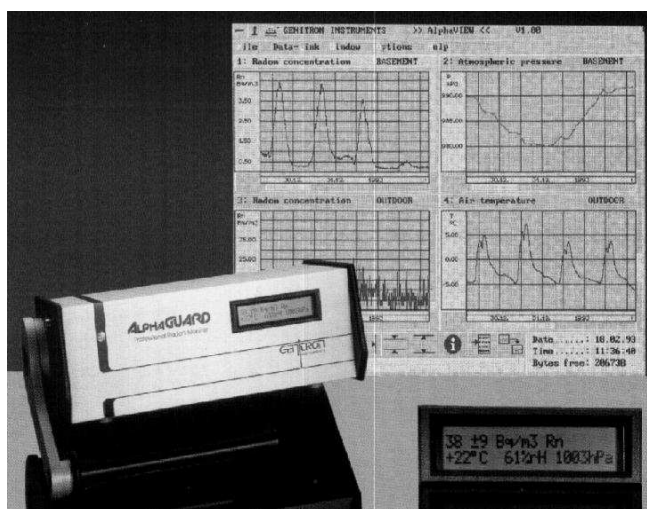


Рисунок 7 - Многопараметрический радоновый монитор-дозиметр «AlphaGUARD PQ 2000» [39]

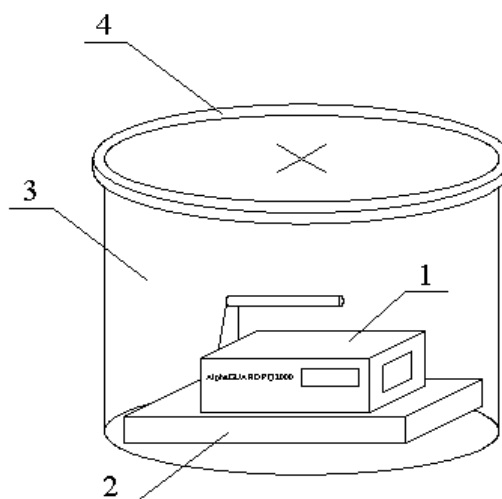


Рисунок 8 - Схема проведения эксперимента: 1-радон-монитор AlphaGUARD; 2- образец испытуемого материала; 3-стальной герметичный эманационный контейнер с крышкой-затвором с вентилятором; 4-стальное кольцо-затвор. [39]

Для проведения измерения уровня радона в ограниченном пространстве использовали эманационный контейнер, рисунок 8. На дно контейнера укладывали измерительные образцы. Над образцами располагали включенный прибор AlphaGUARD . Прибор подключали к разъемам крышки контейнера, которая закрывалась и фиксировалась с помощью запорного механизма. Далее считывалась информация о концентрации радона в контейнере с помощью персонального компьютера и программы обеспечения AlphaEXPERT. Прибор может работать автономно за счет аккумулятора и информация в этом случае считывается после окончания эксперимента.

Полученные результаты показывают, что применение прибора данного класса обеспечивает высокую точность и достоверность производимых измерений.

ГЛАВА 3. Исследование удельной эффективной активности естественной радиоактивности и эманулирующей способности многокомпонентных строительных материалов.

Методика и подготовка к проведению испытаний заключалась в следующем:

1. Реализация подготовительных мероприятий, а именно:
 - изготовление стандартных образцов бетонов согласно требованиям и условиям ГОСТ 10181.3-81 «Смеси бетонные. Методы определения пористости»
 - подготовка стандартных образцов бетонов и исследуемых строительных материалов (щебень, песок и цемент) к инструментальным измерениям;
 - подготовка специального оборудования и средств измерений. Реализация мероприятий, обеспечивающих корректное выполнение всех измерений.
2. Проведение инструментальных измерений, а именно:
 - проведение эманационных измерений в герметичной контейнере;
 - определение содержания Ra-226 в материале стандартного образца.
3. Численное моделирование процесса диффузии радона для подвального помещения на основе эманационных измерений, с учетом скорости поступления радона в поровое пространство бетона.
 - определение скорости выделения радона в поровое пространство бетона и грунта;
 - вычисление длины диффузии для грунта и бетона при заданном коэффициенте диффузии обоих сред;
 - выполнение расчета вероятной концентрации радона в подвальном помещении проектируемого здания и плотности потока радона с поверхности грунта.

3.1 Проведение инструментальных испытаний

В соответствии с НРБ-99/2009 нормирование естественных радионуклидов для строительных материалов производится по величине удельной эффективной активности ($A_{эфф}$), которую определяют по формуле:

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

где A_{Ra} и A_{Th} - удельные активности ^{226}Ra и ^{232}Th , находящихся в радиоактивном равновесии с остальными членами уранового и ториевого рядов;

A_K - удельная активность К-40, Бк/кг.

Согласно гигиеническим нормативам удельная эффективная активность ЕРН не должна превышать значения $A_{эфф} < 370 \text{ Бк/кг}$, при превышении данного показателя материалы используют с ограничением. [4,32]

Удельную активность естественных радионуклидов во всех испытуемых образцах определяли при помощи сцинтилляционном гамма - спектрометр «Прогресс». Для определения содержания естественных радионуклидов в лабораторию поступают отобранные пробы массой не менее 1 кг. Пробы высушивают при температуре не более 400 °С. Затем пробы дробят с помощью дробилки до размера не более 0,5 - 1 мм и тщательно перемешивают для достижения равномерного распределения активности по объёму пробы. После принудительного разрушения исследуемого образца определяют содержание ЕРН в материале, в частности радия-226, как первоначального элемента радона-222. Подготовленную таким образом пробу помещают в стандартную измерительную кювету (чаще всего это цилиндрические жестяные сосуды или сосуды Маринелли объёмом 1 литр) и закупоривают крышкой. Объём заполнения кюветы должен соответствовать номинальному значению с погрешностью не более

$\pm 10\%$. Масса пробы определяется взвешиванием с погрешностью не более $\pm 2\%$ [39]. Затем пробу надёжно герметизируют.

Пакет программ «PROGRESS» предназначен для анализа спектрограм стандартного радионуклидного состава: K-40, Cs-137, Th-232, Ra-226 (в равновесии с дочерними продуктами).

В процессе обработки полученных результатов производится сглаживание спектра и по сглаженной спектрограмме осуществляется автоматический поиск пиков полного поглощения (ППП) с заранее заданным уровнем обнаружения. По окончании обработки ППП производится радионуклидная идентификация результатов обработки и расчёт удельной активности в соответствии с данными прилагаемой библиотеки радионуклидов и массой пробы. Перед каждым измерением необходимо выполнять градуирование спектрометра по энергии.

Определение значений коэффициентов эманирования радона из образцов бетона, песка, щебня и цемента производилось в специальном герметичном контейнере объёмом $0,05\text{ м}^3$ с помощью радиометра «AlphaGUARD Mod. PQ2000». Прибор фиксировал в автоматическом режиме концентрацию радона в воздухе, давление, температуру и влажность каждые 10 мин. В основе метода лежит прямое измерение объёмной активности радона в герметичной емкости, в которую помещали пробу с известным значением удельной активности радия-226. [36]

На дно эманационного контейнера укладывали исследуемый образец строительного материала. Над ним или рядом устанавливается включенный радиометр радона «AlphaGUARD PQ 2000». Прибор подключают к разъемам крышки контейнера, которая герметически закрывается и фиксируется с помощью запорного устройства и фиксируют время герметизации контейнера. По завершении мероприятий производилось считывание из прибора информации о начальных условиях эксперимента при помощи персонального компьютера и программного обеспечения «AlphaEXPERT».

В ходе экспериментов, длительность каждого из которых составила 14 суток на каждый образец, одновременно с изменением радона контролировались и другие параметры среды внутри контейнера: давление, температура и влажность.

Изменение с течением времени объемной активности радона в газовой среде эманационного контейнера соотносимо с содержанием в материале радия-226 и физико-структурными особенностями исследуемого образца.

Процесс накопления радона в воздухе герметичной емкости объемом V_0 (м^3) описывается уравнением баланса:

$$(V_0 - V_{\text{п}}) \cdot dC(t) = [\eta_0 \cdot m - \lambda \cdot C(t) \cdot (V_0 - V_{\text{п}})] \cdot dt, \quad (4)$$

где η_0 – удельная скорость выделения радона, Бк/(кг·с);

m – масса пробы, кг;

$V_{\text{п}}$ – объем пробы, м^3 ;

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

λ – постоянная распада радона, с^{-1} .

Решение уравнения (4) при начальных условиях $C(t=0) = 0$ имеет вид:

$$(V_0 - V_{\text{п}}) \cdot C(t) = \eta_0 \cdot m \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot t)), \quad (5)$$

Измерив ряд значений $C(t_i)$ объемной активности радона в воздухе герметичной емкости в моменты времени t_i , получим ряд значений эманацирующей способности вещества, $\eta_{0,i}$:

$$\eta_{0,i} = \frac{(V_0 - V_{\text{п}}) \cdot C(t_i)}{[m \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot t_i))]} \quad (6)$$

В качестве оценки действительного значения эманлирующей способности вещества принимается среднее арифметическое по полученным данным η_i при $C(t)$ стремящейся к постоянной величине.

При достижении стационарного состояния концентрации радона в герметичной емкости коэффициент эманирования рассчитывают по формуле:

$$K_{\text{эм}} = \frac{C_{Rn} \cdot V}{A_{Ra} \cdot m}, \quad (7)$$

где C_{Rn} - равновесная концентрация, Бк/м³, в герметичной емкости объёмом V , м³;

A_{Ra} – удельная активность радия, Бк/кг.

Параметры эманирования для всех материалов бетона, цемента, песка и щебня были определены в естественном состоянии при нормальной влажности.

3.2 Экспериментальное определение удельной активности материалов и удельной эффективной активности ЕРН

На рисунке 7 представлена спектрограмма удельной и эффективной активности раздробленного бетона, на основе которой были получены экспериментальные данные об активности радионуклидов, а именно - радий, торий и калий, и экспериментальное значение удельной эффективной активности. Аналогично данной спектрограмме были проанализированы все составляющие компоненты тяжелого бетона - цемента, песка и щебня, спектрограммы показаны на рисунках 8, 9 и 10.

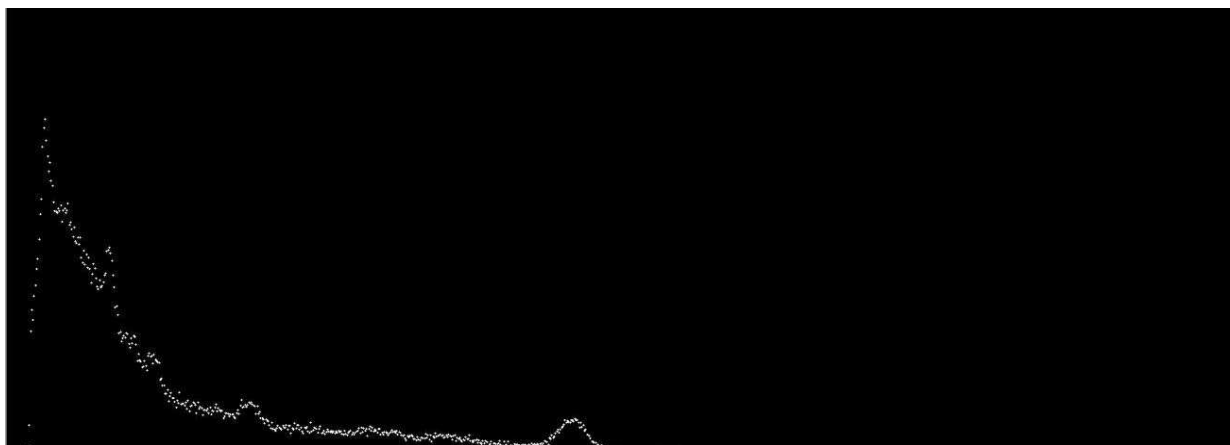


Рисунок 9 – Спектрограмма удельной и эффективной активности раздробленного бетона

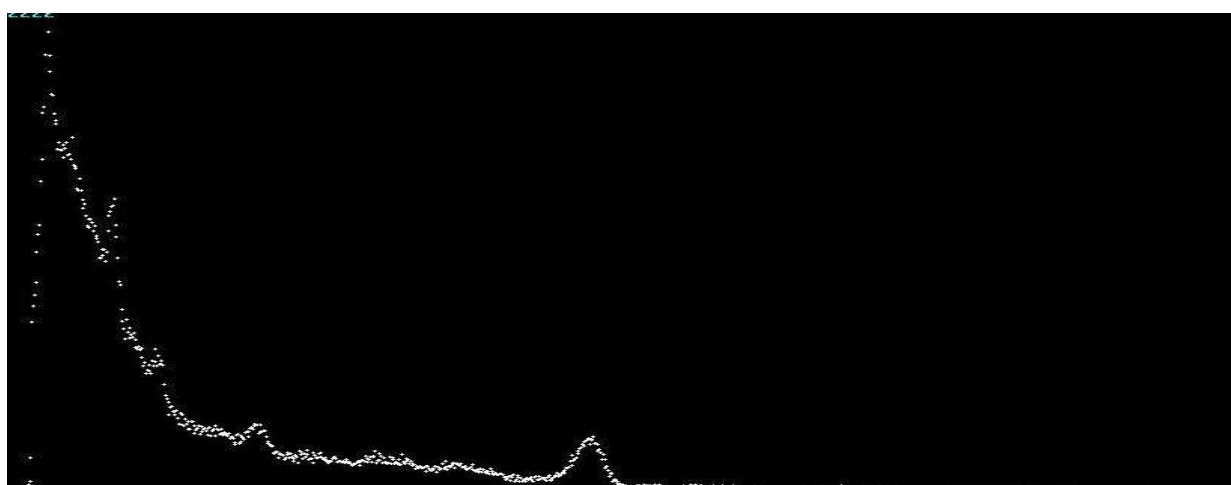


Рисунок 10 – Спектрограмма удельной и эффективной активности песка

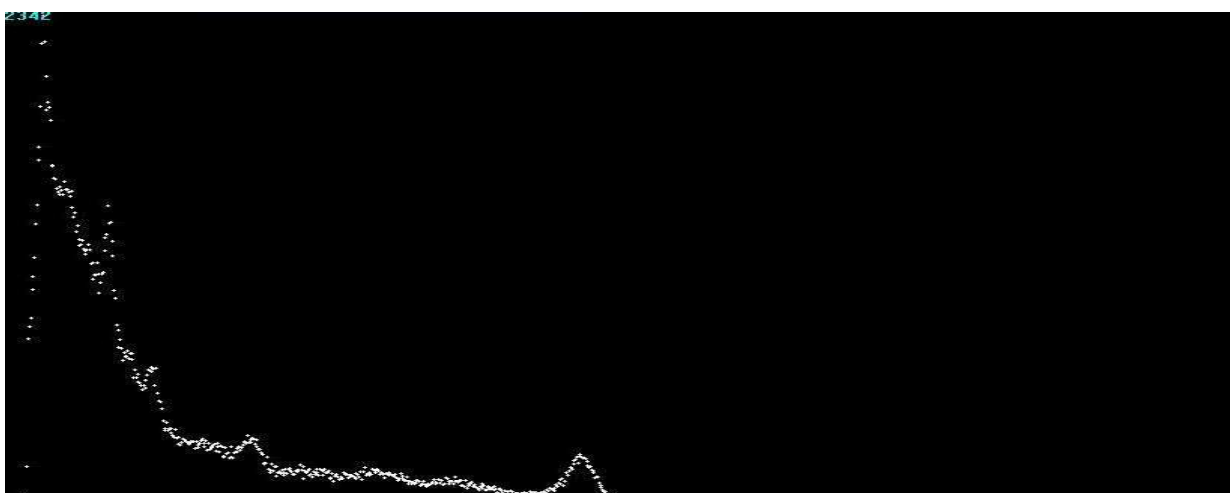


Рисунок 11 – Спектрограмма удельной и эффективной активности щебня

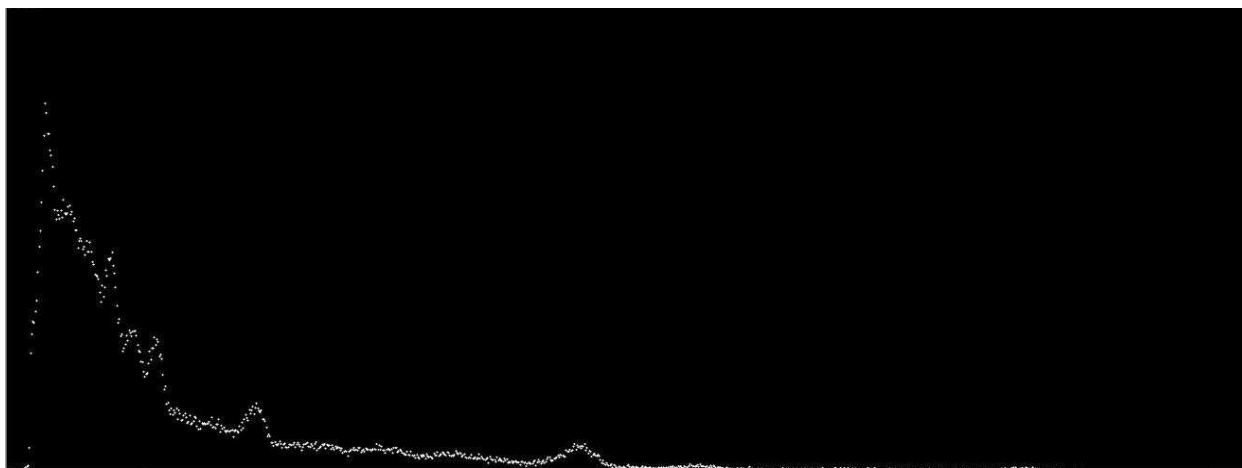


Рисунок 12 – Спектрограмма удельной и эффективной активности песка.

В таблице 6 представлены данные о расходе материалов на один кубический метр тяжелого бетона и показаны экспериментальные средние значения удельной активности и удельной эффективной активности ЕРН.

Таблица 6 - Показатели удельной и эффективной активности материалов с учетом их массового расхода.

Наименование материала	Ra-226, Бк/кг	K-40, Бк/кг	Th-232, Бк/кг	$A_{эфф}$, Бк/кг	Расход материалов, кг/м ³
Цемент	44,8	62,0	14,8	70,0	490
Песок	19,2	396	20,7	80,4	710
Щебень	19,0	488	26,0	94,5	1180
Бетонный образец	25,0	423	21,9	87,9	2380

Расчет удельной эффективной активности бетонного образца $A_{эфф}^{обр}$ производился с учетом массового вклада каждого из компонентов и значений их радиоактивности по формуле:

$$A_{\text{эфф}}^{\text{обр}} = A_{\text{эфф}}^{\text{Ц}} \cdot \frac{m_{\text{Ц}}}{\rho} + A_{\text{эфф}}^{\text{П}} \cdot \frac{m_{\text{П}}}{\rho} + A_{\text{эфф}}^{\text{Щ}} \cdot \frac{m}{\rho}, \quad (8)$$

где, $A_{\text{эфф}}^{\text{Ц}}$, $A_{\text{эфф}}^{\text{П}}$, $A_{\text{эфф}}^{\text{Щ}}$, $m_{\text{Ц}}$, $m_{\text{П}}$, $m_{\text{Щ}}$ – удельные эффективные активности, Бк/кг и расходы цемента, песка, щебня соответственно, кг/м³;

ρ – средняя плотность бетона, кг/м³.

Подставив значения из таблицы 1 в уравнение (3), получим

$$A_{(\text{эфф})}^{\text{обр}} = 70 \cdot \frac{490}{2380} + 80,4 \cdot \frac{710}{2380} + 94,5 \cdot \frac{1180}{2380} = 85,3 \text{ Бк/кг},$$

Сравнив расчетное значение, $A_{\text{эфф}}^{\text{обр}}$ с экспериментальным, получим отклонение расчетного значения от экспериментального на -3%.

3.3 Экспериментальное определение коэффициентов эманирования и эманирующей способности материалов

Эманирование – процесс выделение эманаций радиоактивных газов радона, торона, актинона из твердых веществ в воздушную среду. Соответственно, различают эманирование по радону, торону и актинону.

Определение значений коэффициентов эманирования радона из строительных материалов и сырья в нашей работе производилось с помощью радиометра «AlphaGUARD Mod. PQ2000». В основе метода лежит прямое измерение объемной активности радона в герметичной емкости, в которую помещали пробу с известным значением удельной активности радия-226.

На рисунке 12 представлен график накопления радона в герметичной емкости из пробы бетона массой 11 кг естественной влажности.

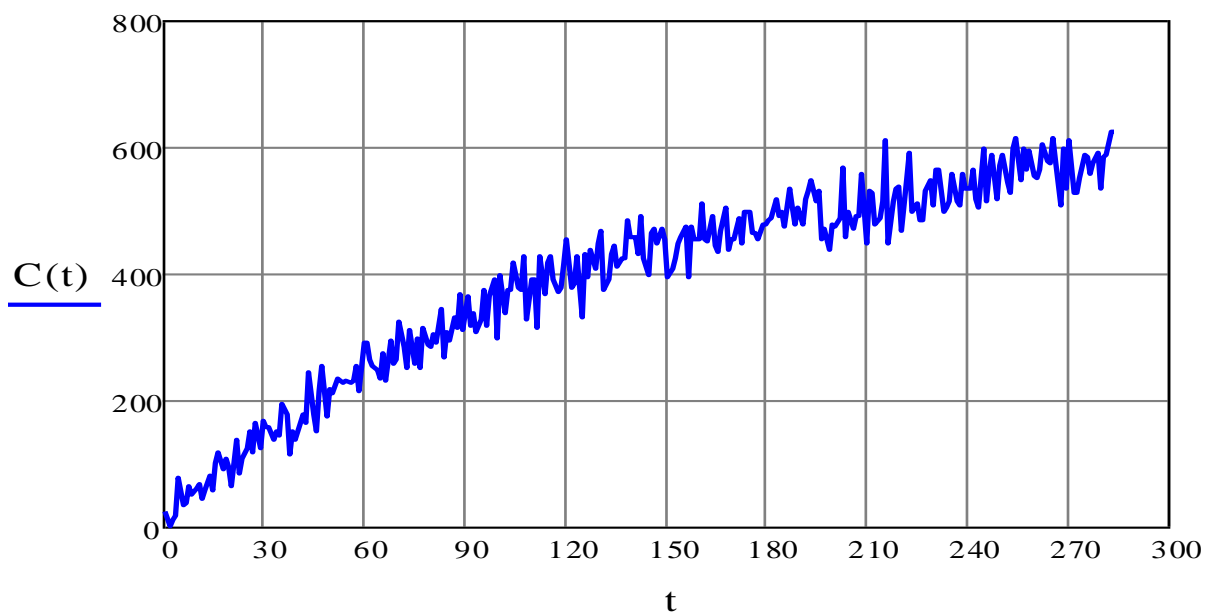


Рисунок 12 - График накопления радона бетонных образцов в герметичной ёмкости.

На рисунке 13 показан график накопления радона в герметичной емкости из пробы сухого цемента массой 5 кг. Как видно на графике, представленного на рисунке 13, накопление радона в негидратированном цементе за 14 суток не произошло, концентрация радона колебалась от 38 Бк/кг до 75 Бк/кг, среднее значение 56,5 Бк/кг. Р.А. Назиров объяснил это так: «...Гидратация материалов в значительной степени изменяет параметры эманирования. Коэффициенты эманирования цементного и зольного камня, несмотря на различия в химико-минералогическом составе, увеличиваются, соответственно, в 8 - 10 раз.» [2]

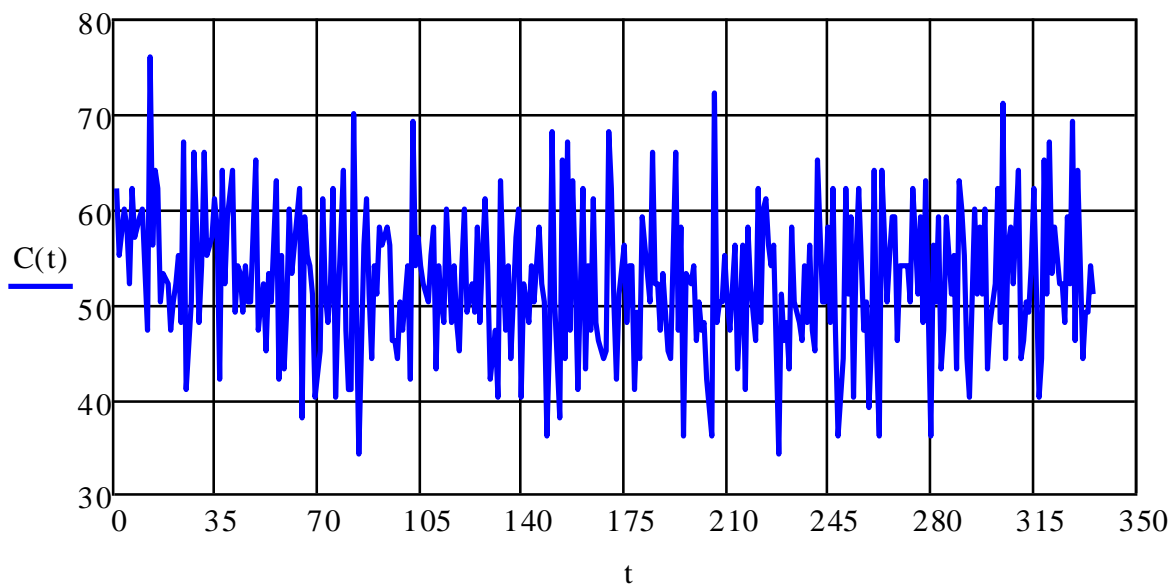


Рисунок 13 - График накопления радона в герметичной ёмкости в образцах негидратированного цемента.

На рисунках 14 и 15 показаны графики накопления концентрации радона в герметичной емкости из пробы щебня и песка естественной влажности, с массой каждого по 5 кг.

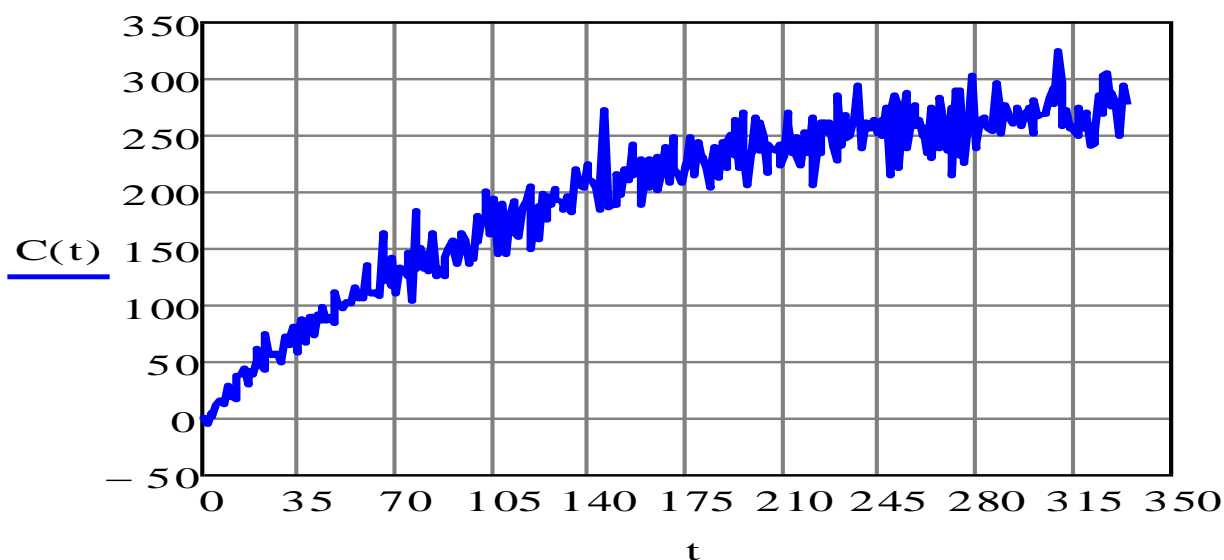


Рисунок 14 - График накопления радона в герметичной ёмкости в образцах щебня.

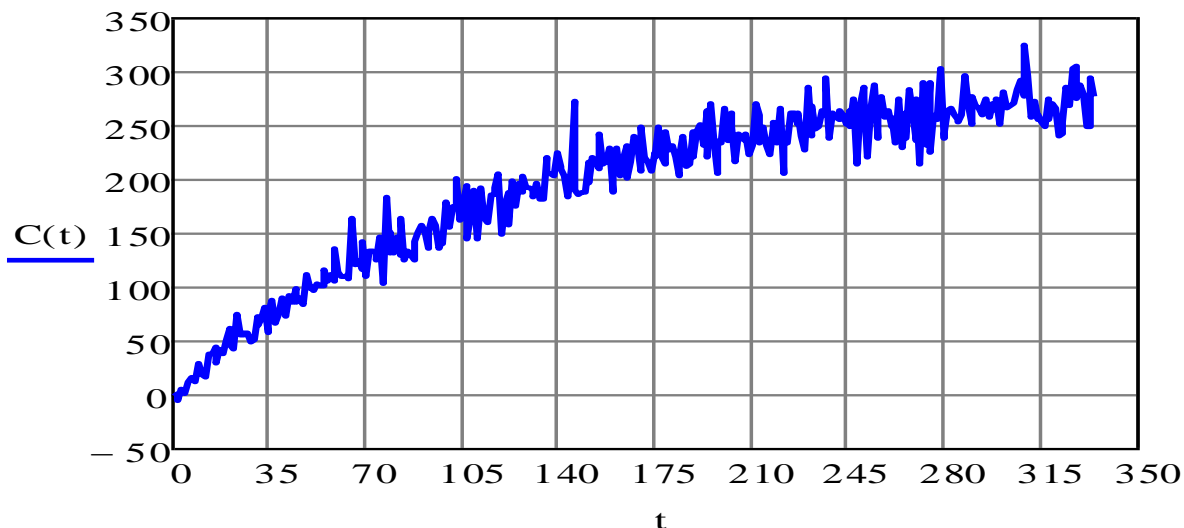


Рисунок 15 - График накопления радона в герметичной ёмкости в песчаных образцах.

На основе данных, представленных на рисунке 16, 17, 18 и 19 с помощью прикладной программы MathCAD рассчитывается эманурующая способность и коэффициент эманирования по формулам (9,10).

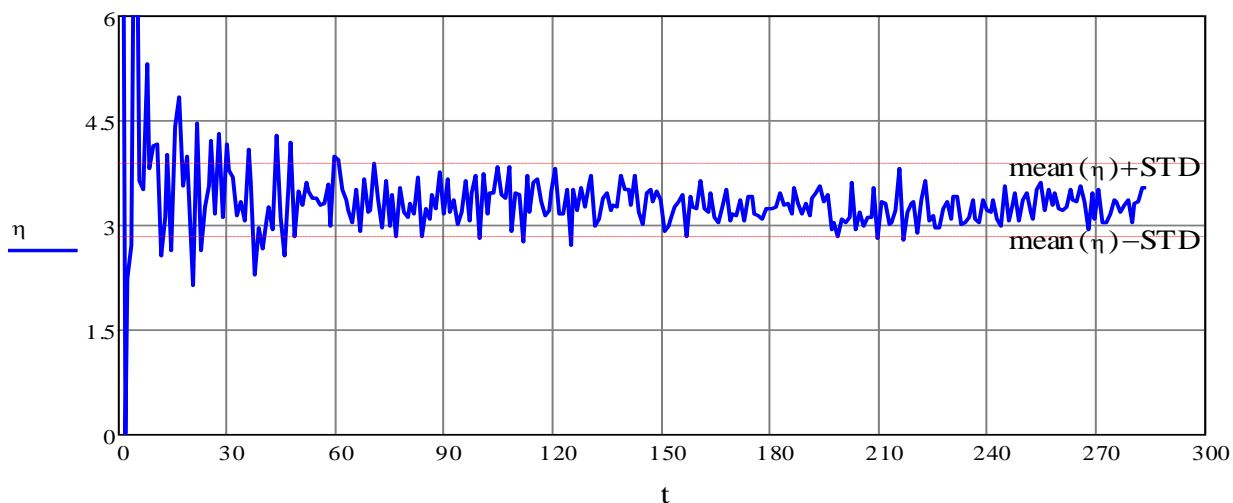


Рисунок 16 – Изменение величины эманурующей способности в бетонных образцах

На графике, представленного на рисунке 16, видно, что равновесие между рождающимися в процессе распада радия атомами радона и выделяющимися в окружающую среду в условиях эксперимента наступает уже через 70-80 часов экспозиции пробы в герметичной емкости.

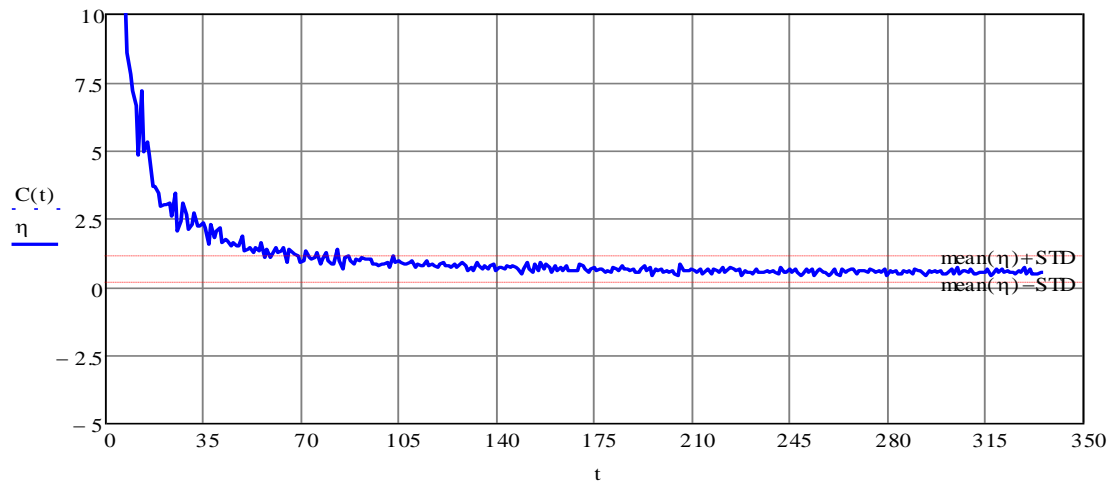


Рисунок 17 – Изменение величины эманурующей способности в образцах негидратированного цемента.

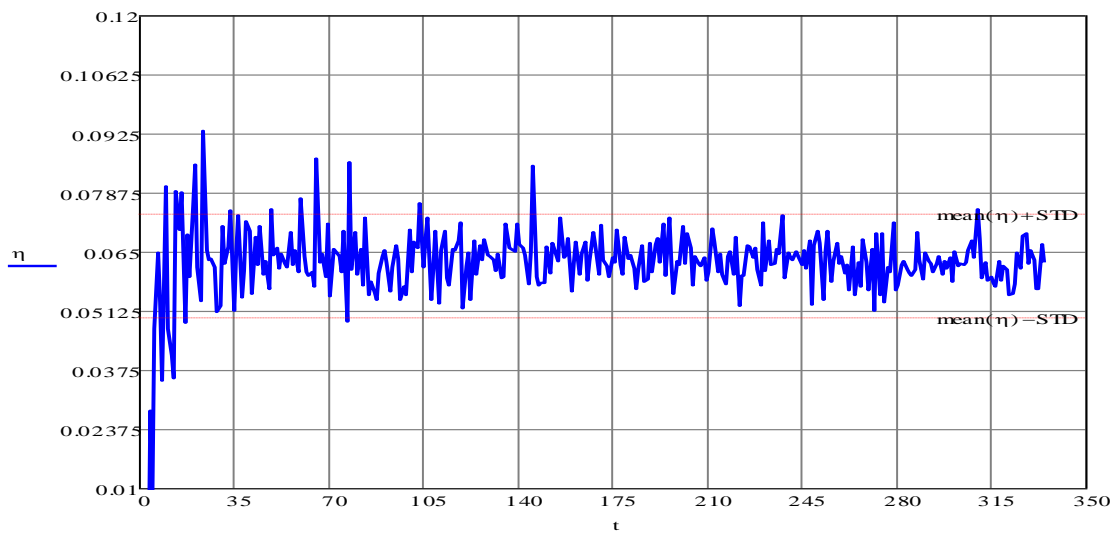


Рисунок 18 – Изменение величины эманурующей способности в щебне.

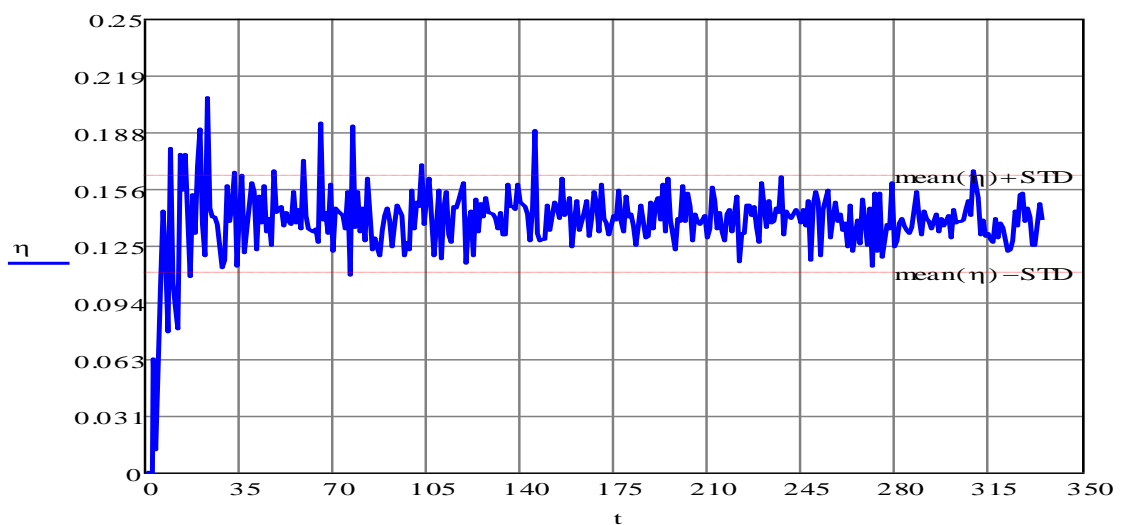


Рисунок 19 – Изменение величины эманурующей способности в песке

На выше представленных графиках, показанных на рисунках 17, 18 и 19, видно, что равновесие между рождающимися в процессе распада радия атомами радона, выделяющимися в окружающую среду, наступает уже через 105 часов испытаний у сухого цемента и 145 часов испытаний у щебня и песка. Таким образом, с увеличением времени испытания отклонение от средней величины стремится к постоянной величине.

В таблице 7 приведены результаты экспериментов – данные по коэффициентам эманирования, эманирующей способности и стандартным отклонениям для компонентов тяжелого бетона.

Таблица 7 - Параметры эманирования компонентов бетонной смеси

Название материала	Масса образцов, кг	Эманирующая способность, Бк/кг	Коэффициент эманирования,	Стандартное отклонение коэффициента эманирования,
Цемент	5,0	0,54	0,012	0,002
Песок	5,0	2,48	0,124	0,012
Щебень	5,0	2,60	0,137	0,027
Бетон	11,0	3,75	0,123	0,021

Рассчитаем эманирующую способность, $\eta^{обр}$ бетонного образца, аналогично расчетному коэффициенту удельной эффективной активности (6) по формуле:

$$\eta^{обр} = \eta^Ц \cdot \frac{m_Ц}{\rho} + \eta^П \cdot \frac{m_П}{\rho} + \eta^Щ \cdot \frac{m_Щ}{\rho}, \quad (9)$$

где, $\eta^Ц, \eta^П, \eta^Щ$ – эманирующая способность цемента, песка, щебня соответственно, Бк/кг;

$m_Ц, m_П, m_Щ$ – расход цемента, песка, щебня соответственно, кг;

ρ – масса образца.

Подставив значения из таблицы 10 в уравнение (9), получим

$$\eta^{\text{обр}} = 0,54 \cdot \frac{495}{2380} + 2,48 \cdot \frac{710}{2380} + 2,60 \cdot \frac{1180}{2380} = 2,14 \text{ Бк/кг}$$

Сравнив расчетное значение, $\eta^{\text{обр}}$ с экспериментальными данными, получим отклонение расчетного коэффициента от экспериментального на 42,9 %.

Э.М. Крисюк отметил, что «вывод о неизменности коэффициента эманирования при приготовлении бетонов и многокомпонентных материалов скорее всего несправедлив для цемента и других мелкодисперсных добавок» и если коэффициент эманирования цемента увеличить в 10 раз, то «...совпадение расчётных и измеренных значений значительно улучшится». Расчётная формула считается очевидной и в этих публикациях не приводится. Далее, он совершенно справедливо отмечает, что «...окончательный вывод о возрастании (примерно в 10 раз) коэффициента эманирования цемента и, возможно, золы при изготовлении бетонов можно дать только на основании прямых измерений...» [25]. В работе [2] представлены результаты многочисленных измерений эманирования у гидравлически активных материалов: цемента и высококальциевой золы до и после гидратации. Установлено, что цементный и зольный камень имеют коэффициенты эманирования на порядок больше, чем исходные цемент и зола.

С учетом данного факта расчетная эманлирующая способность, $\eta^{\text{обр}}$ бетонного образца 3,15 Бк/кг, что уже на 16 % меньше экспериментального определенного значения.

ГЛАВА 4. Расчет вероятной концентрации радона и моделирование процесса диффузии в изолированном подвальном помещении при заданной удельной активности радия и коэффициента эманирования бетона.

4.1 Описание пакета программ COMSOL Multiphysics

В настоящее время современные программные комплексы, такие как COMSOL Multiphysics, позволяют разрабатывать и решать сложные математические и физические модели, и с развитием прикладных программ появилась возможность рассчитывать сложные дифференциальные уравнения, описывающие физические процессы, как, например, процесс диффузии. Практическое применение таких методик расчета снижает энергозатраты на разработку, позволяет моделировать практически все физические процессы и оптимизировать проектные решения.

COMSOL Multiphysics - это мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных (PDE) методом конечных элементов. С этим программным пакетом вы можете расширять стандартные модели, использующие одно дифференциальное уравнение (прикладной режим) в мультифизические модели для расчета связанных между собой физических явлений. Расчет не требует глубокого знания математической физики и метода конечных элементов. Это возможно благодаря встроенным физическим режимам, где коэффициенты PDE задаются в виде понятных физических свойств и условий, таких как: теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, объемная мощность и т.п. в зависимости от выбранного физического раздела. Преобразование этих параметров в коэффициенты математических уравнений происходит автоматически. Взаимодействие с программой возможно стандартным способом – через графический интерфейс пользователя (GUI), либо программированием с помощью скриптов на языке COMSOL Script

или языке MATLAB. Данное пособие рассматривает основы работы с программой только через графический интерфейс.

Программа основана на системе дифференциальных уравнений в частных производных. Существует три математических способа задания таких систем:

- Коэффициентная форма, предназначенная для линейных и близких к линейным моделей;
- Генеральная форма, для нелинейных моделей;
- Слабая форма (Weak form), для моделей с PDE на границах, ребрах или для моделей использующих условия со смешанными и производными по времени.

Используя эти способы, можно изменять типы анализа, включая:

- Стационарный и переходный анализ,
- Линейный и нелинейный анализ.
- Модальный анализ и анализ собственных частот.

Для решения PDE, COMSOL Multiphysics использует метод конечных элементов (FEM). Программное обеспечение запускает конечноэлементный анализ вместе с сеткой учитывающей геометрическую конфигурацию тел и контролем ошибок с использованием разнообразных численных решателей. Так как многие физические законы выражаются в форме PDE, становится возможным моделировать широкий спектр научных и инженерных явлений из многих областей физики, таких как: акустика, химические реакции, диффузия, электромагнетизм, гидродинамика, фильтрация, тепломассоперенос, оптика, квантовая механика, полупроводниковые устройства, сопломат и многих других.

Кроме вышеперечисленного, программа позволяет с помощью переменных связи (*coupling variables*) соединять модели в разных геометриях и связывать между собой модели разных размерностей [41].

4.2 Математическая модель процесса диффузии

Решение задачи диффузии радона, без учета времени, в пористом материале бетона сводится к решению однородного линейного дифференциального уравнения. Для определения концентрации радона автор [27] приводит следующую математическую модель:

$$D \left(\frac{\partial^2 A(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x,y)}{\partial y^2} \right) - \lambda \cdot A(x,y) + W = 0 \quad (11)$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии радона в поровой среде, м²/с,
 $A(x, y)$ – концентрация радона, Бк/м³;
 v – скорость адвекции в порах, м/с;
 λ – постоянная распада радона, с⁻¹;
 W – интенсивность объемных источников, Бк/(м³·с).

Далее, интенсивность объемных источников, рассчитывается по формуле:

$$q = C \cdot \rho \cdot k_{эм} \cdot \lambda \quad (12)$$

где C – удельная активность радия, Бк/кг,
 ρ – плотность материала кг/м³,
 $k_{эм}$ – коэффициент эманирования.

Как видно из уравнений (11, 12) для дальнейших расчетов и моделирования процесса диффузии необходимы численные характеристики материалов, в частности удельную активность радия и коэффициент эманирования в бетоне.

М.В. Жуковский, А.В. Кружалов, В.Б. Гурвич и И.В. Ярмошенко для корректного описания процессов диффузионного поступления радона из грунта в здание предлагают модель, отражающую распределение концентрации радона в

почвенном воздухе под фундаментом здания и около него [27,29]. На рисунке 20 грунт под зданием делится на две области.

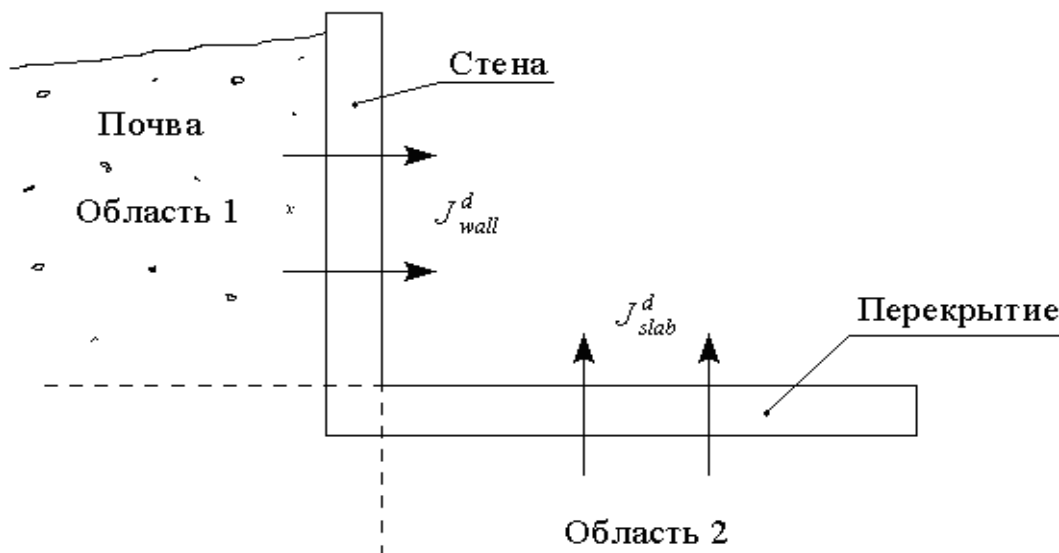


Рисунок 20 - Схема диффузионного поступления радона из почвы в подвальное помещение здания

Область 1 включает в себя стену фундамента здания и почву, непосредственно примыкающую к ней. К области 2 относится фундаментная плита и расположенный под ней грунт. Для обеих областей предполагается, что почва однородна, перенос радона через нее осуществляется только в вертикальном направлении и обусловлен только диффузией, а концентрация радона в почве не зависит от времени [29].

4.3 Исходные данные и методика компьютерного моделирования процесса диффузии

В данной работе построена диффузионная модель массопереноса газа радона в заданном грунте и его эксхалации в воздух подвального помещения проектируемого здания.

Основными задачами численного исследования были:

1. Определить скорость выделения радона в поровое пространство бетона и грунта;
2. Рассчитать длину диффузии для грунта и бетона при заданном коэффициенте диффузии обоих сред;
3. Выполнить моделирование процесса диффузии в изолированном подвальном помещении при заданном коэффициенте эманирования бетона и значению удельной активности радия;
4. Получить значения плотности потока радона с поверхности грунта, боковых стен и внутренних поверхностей плиты перекрытия из расчета в Comsol Multiphysics (модуль Diffusion);
5. Произвести расчет вероятной концентрации радона в воздухе изолированного подвального помещения проектируемого бетонного здания.

В таблице 7 сведены численные параметры и константы, необходимые для моделирования процесса диффузии.

Таблица 7 – Численные параметры и константы численной модели

Численные параметры	Значения
Постоянная распада радона	$\lambda_0 := 0.00755 \text{ час}^{-1}$
Удельная активность радия-226 в материале	$Ra := 25 \text{ Бк/кг}$
Коэффициент эманирования для бетона	$Kc = 0,123$
Коэффициент эманирования для грунта	$Kq = 0,15$
Плотность (беспоровая и беспустотная) для бетона	$\rho = 2650 \text{ кг/м}^3$
Плотность (беспоровая и беспустотная) для грунта	$\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$
Плотность бетона	$\rho = 2400 \text{ кг/м}^3$
Коэффициенты диффузии для грунта	$Dq = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
Коэффициенты диффузии для бетона	$Dc = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$

Высота, толщина ограждающих конструкций и площадь подвального помещения для расчета вероятной концентрации радона приняты по образцу типового жилого здания. Отметка чистого пола первого этажа +0.000, отметка пола подвального помещения -3.000. В дальнейшем, для возможного перерасчета концентрации радона для домов типовых серий, параметры и проектные решения могут меняться.

Конструкции пола и стен подвального помещения представлены в виде:

- Бетонная плита основания нижняя, не облицованная, граничащая с пластом грунта, толщина 200мм, общая площадь 60м²
- Бетонная плита основания верхняя, не облицованная, граничащая с полом первого этажа, толщина 140мм, общая площадь 60м²
- Боковые бетонные стены, необработанные, толщина 400 мм, площадь 28м²

Пласт исследуемого грунта с заданными характеристиками в таблице 11 имеет общую площадь 116,4м² (уже с вычетом подвального помещения).

В проектируемом подвальном помещении не предусмотрена вентиляционная система.

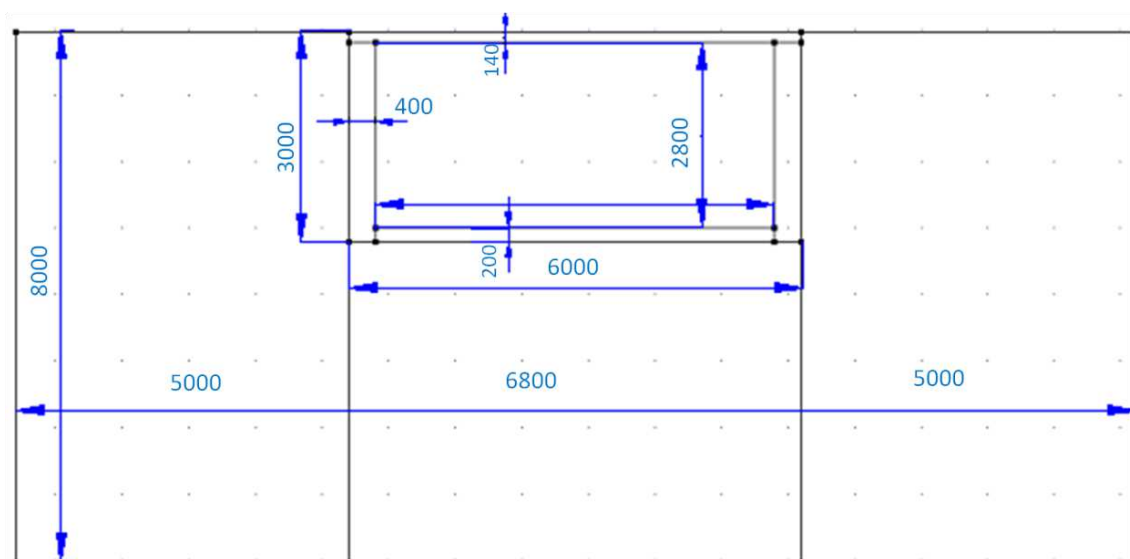


Рисунок 21 – Геометрические характеристики проектируемого подвального помещения

4.4 Расчет скорости и интенсивности диффузионного поступления радона в здание подвального помещения

При выборе участков территорий застройки предусматривают обязательное проведение измерений плотности потока радона (ППР) из грунта. Для строительства объектов жилого и общественного назначения, плотность потока радона ППР с поверхности грунта должна быть не более 80 мБк/(м²·с), и допускается строительство зданий без применения специальных средств их противорадоновой защиты, а для строительства зданий производственного назначения – 250 мБк/м²·с. Измерения ППР производят на поверхности почвы, дна котлована или на нижней отметке фундамента здания, не допускается проведение измерений на поверхности льда и на площадках, залитых водой. [5]

Минимальное и максимальное значение плотности потока радона ППР рассчитывается по формуле:

$$q = \text{ППР}_{\text{ср}} \pm t \cdot \sigma \quad (13)$$

где $\text{ППР}_{\text{ср}}$ - среднее значение потока радона на обследуемом участке, Бк/(м²·с);

t - коэффициент от количества измерений N , принимаемой по вероятности (p); σ - стандартное отклонение логарифмов.

Скорость поступления радона в помещение через грунт и пол помещения за счет диффузии рассчитывается следующим образом:

$$S_D = A_{\text{grnd}} \cdot \text{ППР} \quad (14)$$

где A_{grnd} - площадь соприкасающихся с грунтом и пола в подвальном этаже, м².

Скорость выделения в поровое пространство определяют по формулам:

Для грунта:

$$Q_q = \frac{A_{Ra} \cdot K_q \cdot \rho_q \cdot \lambda}{\left(\frac{\rho - \rho_q}{\rho}\right)} \quad (15)$$

где K_q - коэффициент эманирования для грунта;

ρ_q - беспоровая плотность грунта, кг/м³;

ρ - поровая плотность грунта, кг/м³.

Для бетона:

$$Q_q = \frac{A_{Ra} \cdot K_c \cdot \rho_c \cdot \lambda}{\left(\frac{\rho - \rho_c}{\rho}\right)} \quad (16)$$

где K_q - коэффициент эманирования для грунта;

ρ_c - беспоровая плотность бетона, кг/м³;

ρ - поровая плотность бетона, кг/м³.

Длина диффузии радона является одним из параметров, определяющих скорость выхода радона из стеновых ограждений, а значит и объёмную активность радона в помещении, определяется по формуле:

Для бетонных плит:

$$L_c = \sqrt{\frac{D_c}{\lambda}} \quad (17)$$

где D_c - коэффициент диффузии в бетоне, равный $1 \cdot 10^{-7}$ м²/с;

λ - постоянная распада радона, равная 0.00755 час⁻¹.

Для грунта:

$$L_c = \sqrt{\frac{D_q}{\lambda}} \quad (18)$$

где D_q - коэффициент диффузии в грунте, равный $7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;

λ - постоянная распада радона, равная 0.00755 час^{-1} .

Примем следующие характеристики грунта: беспоровая плотность $\rho=1600 \text{ кг/м}^3$, коэффициент эманирования $K_q = 0,15$. При заданных условиях, длина диффузии радона в грунте составит $L_c = 1,827 \text{ м}$. Длину диффузии радона в тяжелом бетоне составляет $L_c = 0,218 \text{ м}$, при коэффициенте диффузии $D_c = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

4.5 Компьютерное исследование процесса диффузии радона.

4.5.1 Модель плотности потока радона в изолированном подвальном помещении проектируемого жилого бетонного здания

Основным признаком потенциальной радоноопасности земельных участков, значение которого подлежит определению при радиационном контроле, является плотность потока радона (ППР) с поверхности грунта на участке планируемой застройки в пределах контура проектируемых объектов строительства [30]. Для строительства объектов жилого и общественного назначения, плотность потока радона ППР с поверхности грунта не должно превышать значение $80 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, и допускается строительство жилых и общественных зданий без применения специальных средств для противорадовой защиты.

Результаты моделирования процесса переноса подпочвенного радона в грунте и в ограждающих конструкциях, и его выходе в воздух подвального помещения, представлен на рисунке 23.

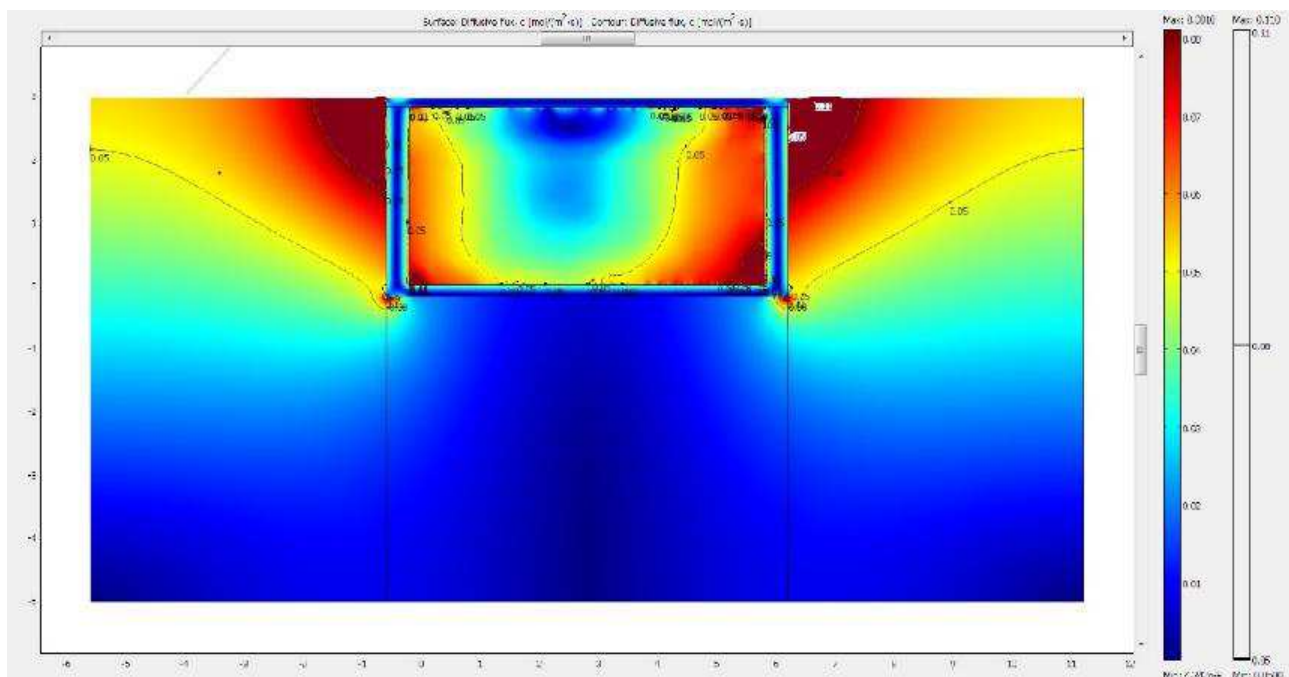


Рисунок 23 - Плотность потока радона в изолированном подвальном помещении проектируемого жилого бетонного здания.

Из приведенных результатов моделирования, представленных на рисунке 23, при заданных условиях, процесс переноса подпочвенного радона в грунте и ограждающих конструкциях, и в выходе в воздух подвального помещения плотность потока радона в грунте распределяется неравномерно. Максимальная интенсивность выхода радона наблюдается в пласте грунта, вдоль $\frac{1}{2}$ длины вертикальных ограждающих конструкций, и в воздухе подвального помещения, где пиковые значения достигаются по всему периметру подвального помещения. Минимальная интенсивность выхода радона наблюдается в грунте под нижней плитой основания. Максимальные значения плотности потока радона наблюдаются в углах конструкций и вдоль вертикальных стен подвального помещения, это связано, с дополнительным потоком радона из массивных конструкций тяжелого бетона.

На рисунках 24, 25 и 26 приведены графики изменения плотности потоков радона для всех видов конструкций подвального помещения.

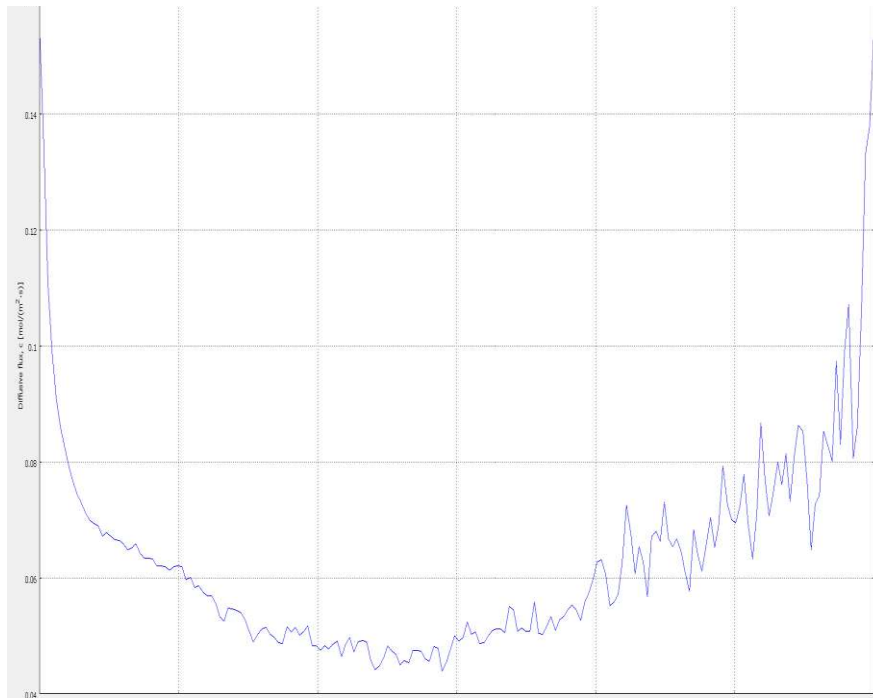


Рисунок 24 – Изменение плотности потока радона с поверхности вертикальной плиты в пласт грунта.

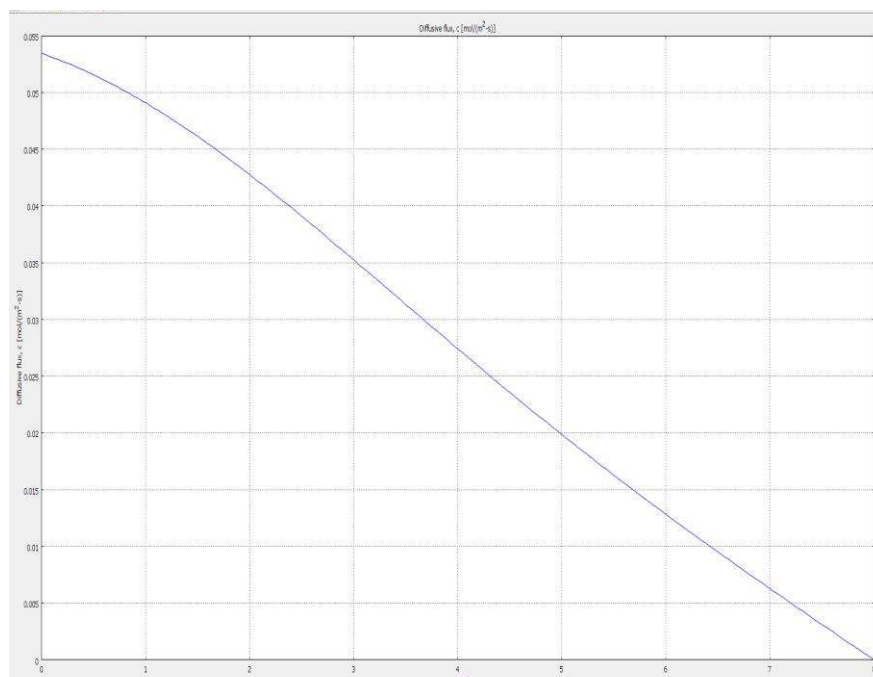


Рисунок 25 - Распределение плотности потока радона вдоль вертикальной ограждающей конструкции (верх - низ).

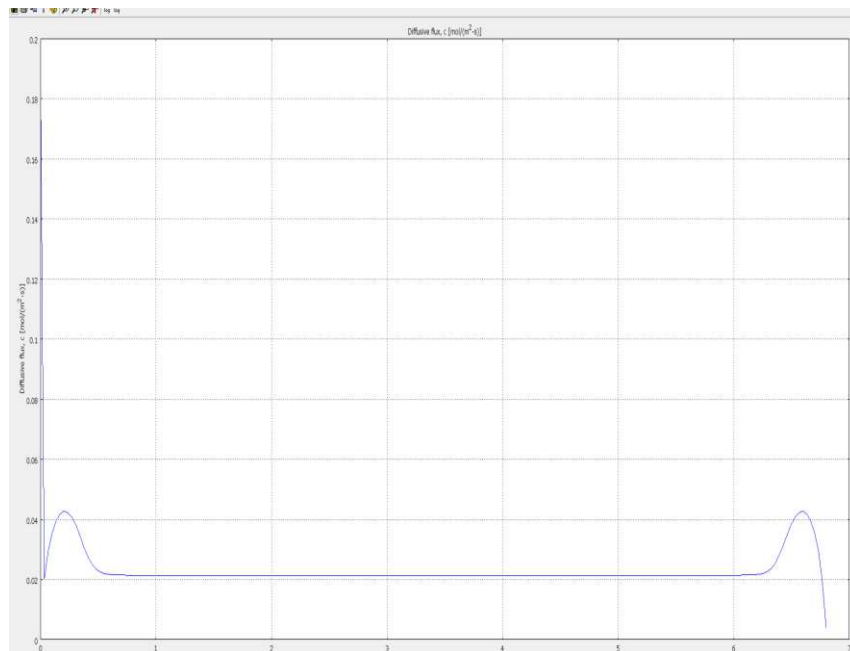


Рисунок 26 – Изменение ППР с пола первого этажа через бетонное перекрытие.

В численный расчет принимаем наиболее неблагоприятное помещение здания, так как ограждающие конструкции непосредственно контактируют с грунтом. В таблице 8 сведены численные значения плотности потока радона и скорости поступления радона в помещение, полученные в результате моделирования.

Таблица 8 – Численные значения ППР и скорости поступления радона в конструкциях подвального помещения.

Конструкция	Скорость поступления радона в помещение [Бк/с]	Плотность потока радона ППР [Бк/(м ² ·с)]
Из верхней плиты основания	1,26	0,0214
С боковых ограждающих конструкций	4,32	0,0777
Из нижней плиты основания, граничащая с грунтом	4,5	0,0756
Сумма	10,08	0,1743
В объеме помещения	-	0,0600

Численное значение плотности потока радона, взятое с поверхности моделируемого грунта равно $55 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, и не превышает нормируемое значение для строительства жилых зданий и соответствует среднему значению ППР по Красноярску [28].

4.5.2 Модель концентрации радона в изолированном подвальном помещении проектируемого жилого бетонного здания

Концентрация радона, в помещении обусловленная диффузионным проникновением радона через строительные конструкции и поступлением с наружным воздухом без учета наличия конвективных путей поступления радона через отверстия, щели и трещины в конструкциях стен подвального помещения и бетонного пола.

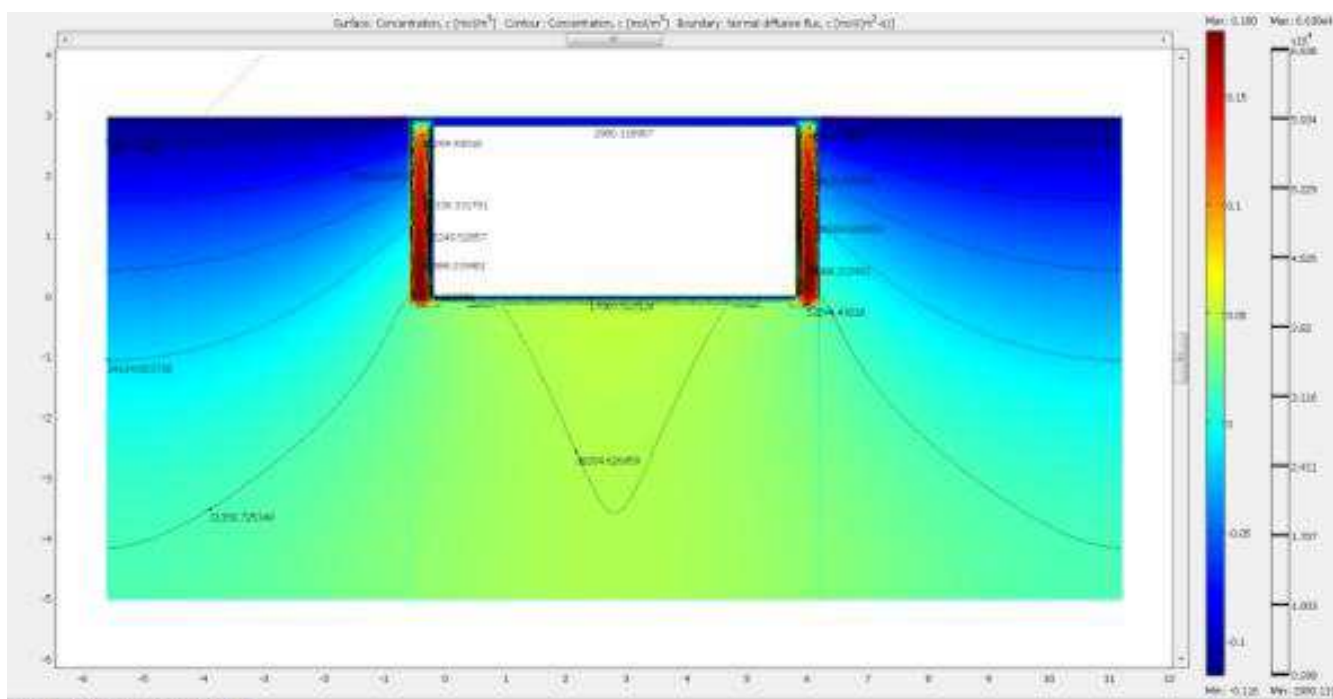


Рисунок 27 - Концентрация радона в грунте и ограждающих конструкциях подвального помещения.

Результаты распределения концентрации радона в грунте, ограждающих конструкциях и воздухе подвального помещения, полученные при моделировании процесса диффузии, представлены на рисунках 27 и 29.

Как видно на модели, представленной на рисунке 27, при заданных условиях, концентрация радона в грунте распределяется неравномерно и возрастает от своего минимального значения на поверхности и вглубь пласта грунта. Максимальная концентрация создается в зоне центральной оси здания. Основание здания препятствует свободному выходу радона на поверхность, в связи с этим под плитой образуются повышенные значения концентрации радона.

Изменение концентрации радона в пласте грунта, при разной глубине залегания, представлено на рисунке 28.

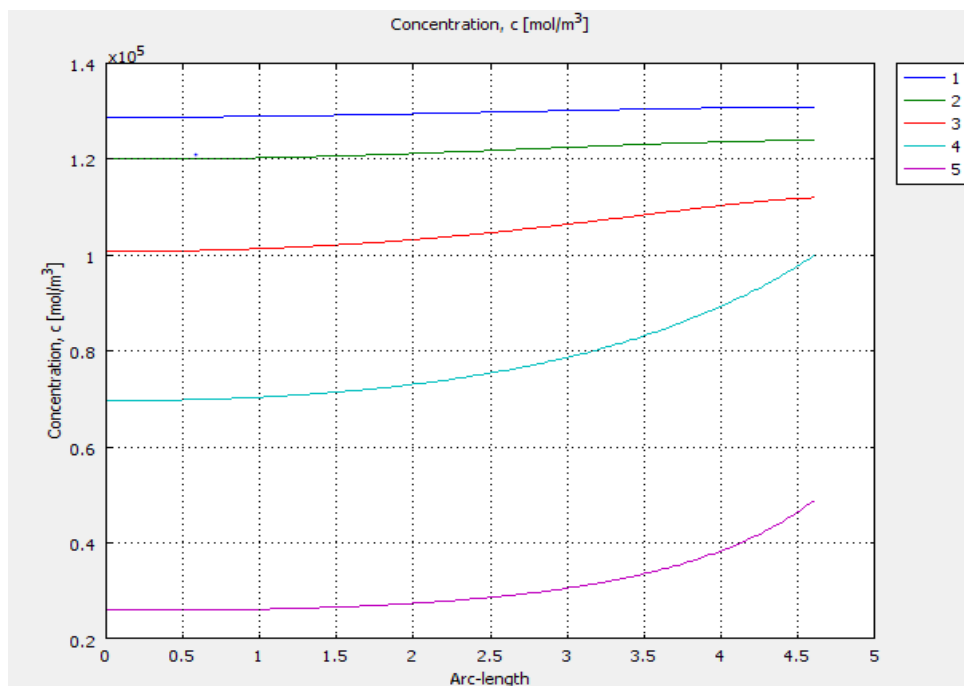


Рисунок 28 – Изменение концентрации радона в грунте при различных значениях глубины залегания пласта грунта

На модели, показанной на рисунке 29, при заданных условиях концентрация радона в ограждающих конструкциях распределяется неравномерно. Это объясняется тем, что по мере увеличения глубины залегания вертикальной конструкции увеличивается и радоновая нагрузка на нее. Повышенные концен-

трации наблюдается в массивных конструкциях на границе с пластом грунта и распределяются до 0,5 ширины.



Рисунок 29 - Концентрация радона в ограждающих конструкциях и в воздухе подвального помещения.

В результате моделирования процесса диффузии, было получено среднее численное значение концентрации радона в воздухе помещения, равное $C_{\text{числ}} = 243,3 \text{ Бк/м}^3$, при общей площади стен $S = 209,6 \text{ м}^2$, при высоте этажа $H = 2,8 \text{ м}$ и коэффициенте воздухообмена $n = 1 \text{ ч}^{-1}$.

Была выявлена зависимость кратности воздухообмена и концентрации радона в воздухе, так как концентрация радона в воздухе внутри помещений зависит в основном от скорости выделения радона из грунта под зданием и ограждающих конструкций, концентрации радона в атмосферном воздухе и кратности воздухообмена, что и показано в таблице 9.

Таблица 9 – Зависимость кратности воздухообмена и концентрации радона

Кратность воздухообмена, ч^{-1}	Концентрация радона, Бк/м^3
0,1	2433
0,5	486,6
1	243,3
2	121,65

Повышенные значения концентрации радона обусловлены низкой кратностью воздухообмена в помещении и наоборот. При расположении в подземной части здания помещений с пониженным воздухообменом вероятность проникновения радона в помещения повышается в обратно - пропорциональной величине. При устройстве изолированных или слабо вентилируемых подвалов и подполий радоноизолирующая способность подвального перекрытия должна быть максимально повышенной. [2] На рисунке 22 показана точечная диаграмма зависимости концентрации радона от кратности воздухообмена

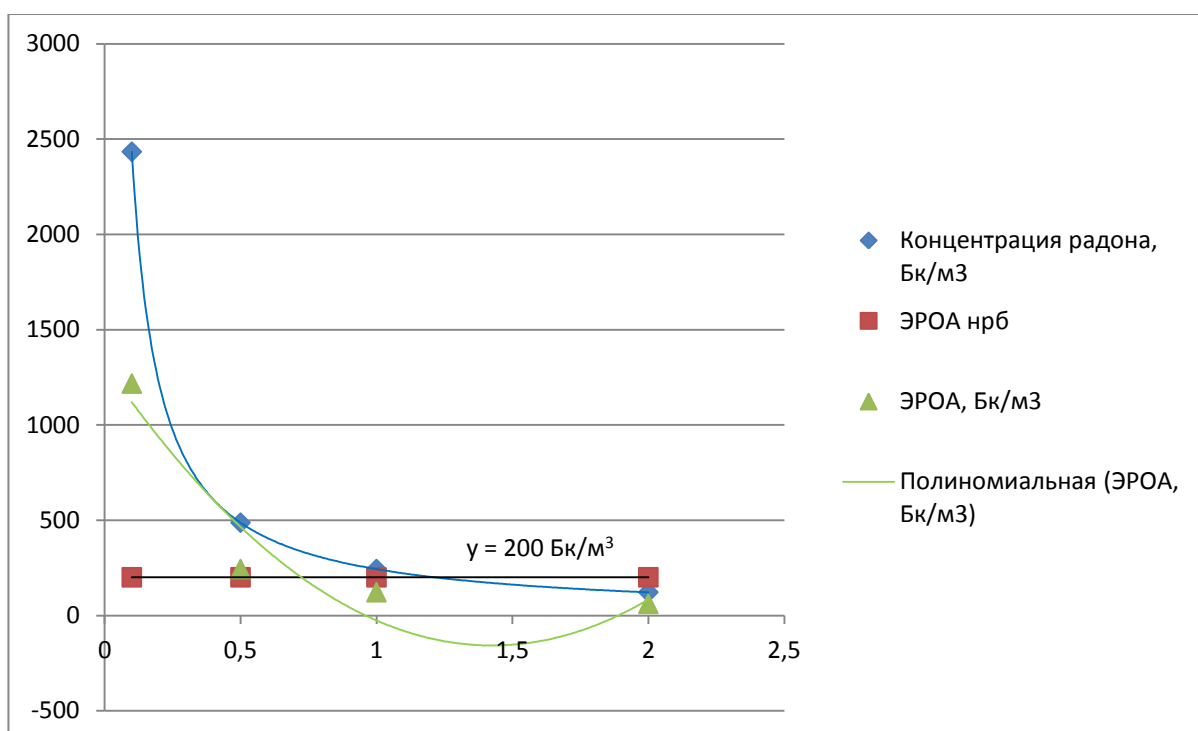


Рисунок 22 - Зависимость концентрации радона и кратности воздухообмена

Численное значение эквивалентной равновесной объемной активности радона (ЭРОА) для воздуха подвального помещения:

$$\text{ЭРОА} = C \cdot f = 121,65 \text{ Бк/м}^3 \quad (19)$$

где $f = 0,5$ – коэффициент радиоактивного равновесия радона с ДПР;
 $C = 243,3$ Бк/м³ - концентрация радона в воздухе подвального помещения,
при кратности воздухообмена $n = 1$ ч⁻¹.

Полученное численное значение ЭРОА дочерних продуктов изотопов радона в подвальном помещении при кратности воздухообмена равное 1ч⁻¹, не превышает допустимую среднегодовую величину для жилых и общественных зданий, равное 200 Бк/м³. [4]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования многокомпонентного строительного материала – тяжелого бетона по определению удельной эффективной активности ($A_{эфф}$) естественных радионуклидов (ЕРН) и эманированию по радону в воздушную среду. В ходе работы были проведены комплексные исследования процесса диффузии и поступления, скорости выхода радона в воздух жилых помещений, с применением аналитических и численных экспериментов. Были получены следующие результаты:

1. Удельную эффективную активность материалов, не подвергающиеся термической обработке, можно рассчитать, учитывая массовые расходы компонентов, входящих в состав бетона.
2. Прогнозирование эманирования готового бетона на основе показателей эманирующей способности его отдельных компонентов (песок, щебень, цемент) без учета гидравлической активности цемента не представляется возможным.
3. Предложена формула для расчета и прогнозирования естественной радиоактивности многокомпонентного материала (на примере тяжелого бетона) на основе данных о естественной радиоактивности и массового состава его компонентов: цемента, мелкого и крупного заполнителя. Установлена принципиальная возможность получения достоверных расчетных значений удельной эффективной активности многокомпонентных строительных материалов на основе цемента.
4. На основе полученных значений удельной активности ЕРН и коэффициента эманирования бетона, было выполнено компьютерное моделирование процесса диффузии массопереноса, и спрогнозирована концентрация радона в помещении и плотность потока с поверхности грунта. Численное значение концентрации радона в воздухе подвального помещения равно $C = 243,3$ Бк/м³. Численное значение плотности потока радона, взя-

тое с поверхности моделируемого грунта, равно $\text{ППР} = 55 \text{ мБк/м}^3 \cdot \text{с}$, и соответствует среднему значению ППР по Красноярску. Полученные численные значения соответствуют нормативным.

5. Была выявлена зависимость кратности воздухообмена и концентрации радона в воздухе, так как концентрация радона в воздухе внутри помещений зависит от скорости выделения радона из грунта под зданием и ограждающих конструкций. Повышенные значения концентрации радона в воздухе помещений обусловлены низким воздухообменом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. История становления лаборатории дозиметрии природных источников в Институте радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева: 1970–1986 гг. / Э.П. Лисаченко, И.П. Стамат, Н.А. Королева - Радиационная гигиена Том 9 № 1, 2016
2. Назиров, Р. А. Развитие научных основ и методов получения строительных материалов с заданными радиационно-экологическими свойствами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05; 25.00.36 / Назиров Рашит Анварович. – Красноярск, 2003. – 501 с.
3. Кузин А.М. Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли / А.М. Кузин. – М.: Наука. – 1991. – 115 с.
4. НРБ – 99/2009 Нормы радиационной безопасности: Гигиенические нормативы. – М.: Центр санитар.-эпидемиолог. нормирования, гигиен. сертификации и экспертизы Минздрава России, 2009.
5. СП 2.6.1.799-99 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности, ОСПОРБ-99»
6. Федеральные законы РФ «О радиационной безопасности населения» № 3-ФЗ от 09.01.96 г. и «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» № 52-ФЗ от 30.03.99г. [№ 3-ФЗ; № 52-ФЗ]
7. Радон: учеб. пособие / М. Н. Левин, О. П. Негроров, В. Р. Гитлин [и др],// – Воронеж. издат. полиграф. центр Воронеж. гос. ун-та, 2008. – 41,с.
8. Природный радиационный фон. Учебное пособие для вузов / М.Н. Левин, О.П. Негроров, В.Р. Гитлин, О.В. Селиванов, О.А. Иванова. – Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2008. – 52 с.
9. Уткин, В. И. Газовое дыхание Земли / В. И. Уткин // Сорос. образов. журнал. № 1. 1997. С. 57–64.
10. Уткин, В. И. Радоновая проблема в экологии / В. И. Уткин // Сорос. образов. журнал. том 6. № 3. 2000. – С. 73–80.

11. Байрамов А.А. Исследование уровня радиационного фона при полетах на самолетах / А.А. Байрамов, А.М. Пашаев, Р.М. Джафарзаде // Fizika. Cildiva № 4. – 1998. – С 56-58.
12. Моисеев А.А. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене / А.А. Моисеев, В.И. Иванов. 3-е изд., перераб. и доп. – М: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
13. Польский О.Г. Медицинское облучение: необходимый риск / О.Г. Польский // Безопасность окружающей среды. – 2007. - №1. – С. 24-27.
14. Наркевич Б.Я. Основы радиационной безопасности в медицине / Б.Я. Наркевич // Радиология – практика. – 2008. -№6. – С. 57-67.
15. Морозов В.Г. Оценка медицинского облучения населения в субъектах Российской Федерации / В.Г. Морозов, Р.К. Исмагилов, А.М. Мусин // Радиационная гигиена. – 2008. – Том 1, № 4. С.
16. Власиленко И.Я. Радиационный цезий – 137 / И.Я. Власиленко // Природа. – 1999. – № 3. – С. 70–76.
17. Справочник. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2006 году / А.Н. Барковский, Н.К. Барышков, В.Ю. Голиков, Т.А. Кормановская // Федеральное государственное учреждение науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева». – Санкт-Петербург, 2007. – 33 с.
18. Нефедов, В. Д. Радиохимия: учеб. пособие / В. Д. Нефедов, Е. Н. Текстер, М. А. Торопова. – М.: Высш. шк., 1987. – 272 с.
19. Несмеянов, А. Н. Прошлое и настоящее радиохимии / А. Н. Несмеянов. – Л.: Химия, 1985. – 169 с.
20. Титаева, Н.А. Ядерная геохимия. Учебник.- 2-е изд., испр. и доп. / Н.А. Титаева – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 336 с.
21. Hopkins Curt. Radon Bulletin / Curt Hopkins // 17th National Radon Conference. Conference of Radiation Control Program Directors. – 2007. – 17 p.
22. Шашкин, В. Л. Эманирование радиоактивных руд и минералов / В. Л. Шашкин, М. И. Пруткина. – М.: Атомиздат, 1979. – 112 с.

23. Спицын В.Л. О механизме выделения эманаций из радиоактивных минералов в жидкие и твердые среды / В.Л. Спицын // Труды по изучению радия и радиоактивных руд Т. 2. – 1926. – С. 264-268.
24. Токарев, А. Н. Радиогидрогеология / А. Н. Токарев, А. В. Щербаков. – М.: Атомиздат, 1956. – 263 с.
25. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. - М.: Атомиздат, 1989 - 120 с.
26. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах: Публикация 65 МКРЗ / Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1995. - 68 с.
27. Гулабянц Л.А., Лившиц М.И., Медведев С.В. Определение радоновой нагрузки на подземные ограждающие конструкции здания // АСАСЕМІА, Архитектура и строительство. 2016 №1. С.122-128
28. Кургуз С.А. Радонозащитные свойства лакокрасочных и рулонных материалов для покрытий бетонных конструкций: дис ... канд. техн. наук. Красноярск, 2003. 36 с.
29. Тарасов И.В. Цементные и бетоны и растворы с пониженной естественной радиоактивностью и радонопроницаемостью: дис... канд. техн. наук. Красноярск, 2008. 45 с.
30. 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.
31. Алексахин К.М., Гуськова А.К. 42-я сессия научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР 17-28 мая 1993 г.) ООН, Медицинская радиология и радиационная безопасность, 1995. №2.
32. ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. (с Изменениями N 1, 2) М.: Госстрой России, 1995

33. Павлов И.В., Покровский С.С., Камнев Е.Н. Способы обеспечения радиационной безопасности при разведке и добыче урановых руд. - М.: Энергоатомиздат, 1994. 256 с.
34. Шашкин В.Л., Пруткина М.И. Эманирование радиоактивных руд и минералов. - М.: Атомиздат, 1979
35. Шумкова Н.Н. Выделение радона из отдельностей рудного массива и кусков отбитой руды //Технический прогресс в атомной промышленности. Сер. Горно-металлургическое производство. М.: ЦНИИАтоминформ, №3,1992
36. Удельная активность ^{222}Rn в воде. Методика выполнения измерений в применении Радиометра объемной активности радона-222 «AlphaGUARD Mod. PQ2000». – PT Positron Technology GmbH, 1998. – 41с.
37. Бекман И.Н. РАДОН: ВРАГ, ВРАЧ и ПОМОЩНИК Курс лекций <http://profbeckman.narod.ru/rad.files/Rad3SS.pdf>
38. Назиров Р.А., Экспериментальная оценка и сравнительный анализ эманирования материалов в воду воздух / Р.А. Назиров, А.А. Романова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2010 №4 (44). – С.101–104
39. Методика выполнения измерений содержания естественных радионуклидов радия-226, тория-232, калия-40 и радионуклида цезия-137 в строительных материалах и изделиях на сцинтилляционных спектрометрах типа TL 1309 (МКГ-1309) и МКС-АТ1315. Разработчик: Научно-производственное единичное предприятие «АТОМТЕХ» . – М., – 20 с.
40. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс». – Менделеево, ВНИИФТРИ, 2005. – 23 с.
41. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности [текст] : учеб. пособие / Егоров В.И СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. - 77 с

ПРИЛОЖЕНИЕ А

УДК 691.32

Р. А. Назиров, Н. А. Зайцева, П. Ю. Веде

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ АКТИВНОСТИ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ И ЭМАНИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МНОГО КОМПОНЕНТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работе представлены результаты исследования многокомпонентного строительного материала – тяжелого бетона по определению удельной эффективной активности ($A_{эфф}$) естественных радионуклидов (ЕРН) и эманированию по радону в воздушную среду. Предложена формула для расчета и прогнозирования естественной радиоактивности многокомпонентного материала (на примере тяжелого бетона) на основе данных о естественной радиоактивности и массового состава его компонентов: цемента, мелкого и крупного заполнителя. Установлена принципиальная возможность получения достоверных расчетных значений удельной эффективной активности многокомпонентных строительных материалов на основе цемента. Показано, что прогнозирование эманирования многокомпонентных цементных составов по аддитивному закону не представляется возможным без учета изменения увеличения эманирования в результате гидратации цемента.

Ключевые слова: радиационная безопасность, естественная радиоактивность, строительные материалы, бетон, удельная эффективная активность, эманирование.

Введение

Примерно 2/3 всей дозовой нагрузки, получаемой человеком в течение жизни, обусловлено воздействием природных источников ионизирующего излучения. Более половины этой дозы формируется за счёт внутреннего облучения дочерними продуктами изотопов радона, находящихся в воздухе помещений и в воде (табл. 1).

Обеспечение радиационной безопасности населения обуславливает необходимость выявления, изучения, оценки естественной радиоактивности строительных материалов и источников поступления радиоактивного газа радона в воздух жилого помещения.

В работе изучается формирование естественной радиоактивности многокомпонентных строительных материалов и процесс эманирования - выделение радиоактивных атомов радона из строительных материалов в воздушную среду жилого помещения.

Тематика исследования особенно актуальна для регионов с повышенным содержанием естественной радиоактивности строительного сырья и высоким содержанием радона в грунте.

Таблица 1. Средние ежегодные эффективные дозы для взрослого населения от естественных источников облучения [2].

Источник облучения	Области с нормальным естественным фоном	
	мЗв	%
Космические лучи	0,39	16,5
Наземное гамма-излучение	0,46	19,4
Внутреннее облучение (без радона)	0,22	9,3
Радон и продукты его распада	1,30	54,8
Итого:	2,37	100

В современной нормативной документации доза облучения от естественных источников ионизирующего облучения не нормируется. Ограничение облучения населения достигается путем установления системы ограничений на облучение населения от отдельных природных источников излучения [9].

Установлено, что основными источниками внешнего облучения человека, находящегося в помещении, являются гамма-излучающие природные радионуклиды радий-226, торий-232 и калий-40, содержащиеся в ограждающих конструкциях [14].

Зная величину $A_{эфф}$ и геометрические характеристики помещения можно рассчитать мощность дозы гамма-излучения внутри помещения, обусловленного ЕРН, содержащимися в ограждающих конструкциях помещения, и излучения поступающим из окружающего пространства [1, 2].

Внутреннему облучению человек подвергается за счет вдыхания радиоактивного газа радона. Радиоактивный газ радон является естественным источником радиации, невидимый, не имеющий вкуса и запаха, в 7,5 раз тяжелее воздуха. Атомный номер радона – 86, а атомная масса - 222. Радон-222 имеет период полураспада 3,825 дней и распадается с испусканием альфа-частиц. Продукты распада радона, являются радиоактивными элементами и, распадаясь, испускают альфа-, бета- и гамма-излучение.

Находясь в искусственной среде мало проветриваемого жилого помещения, человек подвергается облучению за счет повышенного содержания естественных радионуклидов (ЕРН) и распада дочерних продуктов радона (ДПР) и торона, накапливающихся в воздухе помещений.

Радон, поступающий через органы дыхания, постоянно присутствует в легких человека в концентрации, соответствующей концентрации в воздухе помещения. Облучение радоном приводит к снижению иммунитета и ряду заболеваний, в числе которых онкологические [2,3,4].

По оценке службы здравоохранения США у местного населения зарегистрировано около 20 000 случаев заболевания раком легких с летальным исходом, вызванного воздействием радона. Ущерб для здоровья населения, по её

оценке, «возможно в 10 раз превышает ущерб от загрязнения воздуха вне помещения» [5].

Для снижения показателей заболеваемости, распространенности и смертности в России, как и наравне с другими прогрессирующими странами мира, в нормативных документах установлены уровни предельной допустимой концентрации радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий, предусмотрена обязательная стратегия противорадоновой защиты зданий [4].

Уровень концентрации радона может изменяться в широком диапазоне в зависимости от различных природных и техногенных факторов. Для оценки воздуха помещений используют единицу, которую называют эквивалентной равновесной объёмной активностью ($\text{ЭРОА}_{\text{Rn}} + 4,6 \cdot \text{ЭРОА}_{\text{Tn}}$) изотопов радона и торона. Ее предельно-допустимое значение для воздуха эксплуатируемых жилых и общественных зданий – 200 Бк/м^3 . При проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения должно быть предусмотрено, чтобы ЭРОА в воздухе помещений не превышала 100 Бк/м^3 [9]. Следует заметить, что в большинстве случаев из-за малого периода полураспада только небольшая доля торона может выделиться из строительного материала и почвы. Повышенные концентрации торона, как правило, наблюдаются только в регионах, обогащенных торием.

Основными источниками поступления радона в воздух помещений является грунт под зданием и эманирование ограждающих конструкции. Оценка первого источника особенно актуальна для малоэтажных зданий, однако имеются сведения, что за счет особенностей конвективного переноса и устройства естественной вентиляции повышенные концентрации радона могут формироваться и на верхних этажах [1]. Методическими указаниями [6] устанавливаются нормативы плотности потока радона (ППР) из грунта. Если по результатам определения ППР с поверхности грунта на обследованной площади земельного участка под строительство жилых домов, общественных зданий и сооружений выполняется условие: $\text{ППР} + \delta \leq 80, \text{ мБк (м}^2 \cdot \text{с)}$, в котором δ – погрешность значения ППР, то земельный участок соответствует требованиям санитарных правил

и гигиенических нормативов по данному показателю. Эманирование радона из строительных материалов не нормируется.

Гамма-фон и концентрация радона, как правило, в помещениях зданий имеют большие значения, чем на открытой местности в результате изменения геометрии окружающего пространства и пониженного воздухообмена. Следует заметить, что по результатам отечественных и зарубежных исследований, человек проводит внутри помещений большую часть своей жизни. По некоторым данным, эти значения варьируются от 60 до 90 % [3]. Это обстоятельство особенно актуально для регионов с суровым климатом.

Таким образом, в помещениях формируется доза облучения населения от естественных источников излучения, которой можно управлять на основе знаний о формировании нормированного значения эффективной удельной активности $A_{эфф}$ ЕРН. Для корректной оценки мощности источников поступления радона в воздух помещения, радиационного качества строительных материалов требуются знания о величинах и закономерностях формирования их эманирования.

Материалы и методология. Все эксперименты выполнены в лаборатории радиационного контроля Сибирского федерального университета. Концентрации ЕРН в песке, гравии и цементе определяли в их товарном виде. Пробы бетона через 28 суток твердения измельчали до максимальной крупности гравия. Все образцы до измерения выдерживались в течение 15 суток в сосудах Мариелли. Измерения проводили на стационарном гамма-бета-спектрометре МКС-АТ1315 производства фирмы АТОМТЕХ. Величина эффективной удельной активности $A_{эфф}$ рассчитывалась по формуле:

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

где A_{Ra} и A_{Th} - удельные активности ^{226}Ra и ^{232}Th , находящихся в радиоактивном равновесии с остальными членами уранового и ториевого рядов, A_K - удельная активность К-40 (Бк/кг).

При значении $A_{эфф} < 370$ Бк/кг материалы могут быть применены во всех видах строительства без ограничения [8, 9].

Эманирование – выделение эманаций радиоактивных газов радона, торона, актинона из твердых веществ. Соответственно различают эманирование по радону, торону и актинону. Определение коэффициента эманирования по радону проводится двумя методами: эманационным и гамма-методом. Известны способы определения коэффициента эманирования ($K_{эм}$) порошковых и штучных проб [10, 11, 12], заключающиеся в измерении гамма-активности предварительно деэманированных проб через различные промежутки времени после помещения в герметично закрытый контейнер. Для малоактивных проб с низким $K_{эм}$ используется способ при котором предварительно измельченную или штучную пробу помещают в герметичную емкость для накопления радона на период от нескольких часов до двух недель. Затем измеряют общее количество радона, накопившегося в ёмкости, переводя пробу воздуха в ионизационную или сцинтилляционную камеру вакуумным насосом. Содержание радия в пробе определяют радиометрическим или радиохимическими методами.

Определение значений коэффициентов эманирования радона из строительных материалов и сырья в нашей работе производилось с помощью радиометра «AlphaGUARD Mod. PQ2000». В основе метода лежит прямое измерение объемной активности радона в герметичной емкости, в которую помещали пробу с известным значением удельной активности радия-226.

Процесс накопления радона в воздухе герметичной емкости объемом V_0 (м^3) описывается уравнением баланса [13]:

$$(V_0 - V_n) \cdot dC(t) = [\eta_0 \cdot m - \lambda \cdot C(t) \cdot (V_0 - V_n)] \cdot dt, \quad (2)$$

где η_0 – удельная скорость выделения радона, Бк/(кг·с); m – масса пробы, кг; V_n – объем пробы, м^3 ; $C(t)$ – текущая концентрация радона, Бк/(м^3); λ - постоянная распада радона, с^{-1} ;

Решение уравнения (2) при начальных условиях $C(t=0) = 0$ имеет вид:

$$(V_0 - V_n) \cdot C(t) = \eta_0 \cdot m \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot t)), \quad (3)$$

Измерив ряд значений $C(t_i)$ объемной активности радона в воздухе герметичной емкости в моменты времени t_i , получим ряд значений эманлирующей способности вещества, η_i :

$$\eta_i = \frac{(V_0 - V_n) \cdot C(t_i)}{[m \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot t_i))]} \quad (4)$$

В качестве оценки действительного значения эманлирующей способности вещества принимается среднее арифметическое по полученным данным η_i при $C(t)$ стремящейся к постоянной величине.

При достижении стационарного состояния концентрации радона в герметичной емкости коэффициент эманлирования рассчитывают по формуле:

$$K_{эм} = \frac{C_{Rn} \cdot V}{A_{Ra} \cdot m}, \quad (5)$$

где C_{Rn} - равновесная концентрация, Бк/м³, в герметичной емкости объёмом V , м³.

При определении параметров эманлирования материалов использован специальный герметичный контейнер объемом 0,05 м³. В контейнер помещались испытуемые образцы и радон-монитор AlphaGUARD. Прибор фиксировал в автоматическом режиме концентрацию радона в воздухе, давление, температуру и влажность каждые 10 мин. Полученная информация при помощи прикладной программы считывалась с радон - монитора и преобразовывалась в текстовый файл. Время экспозиции для каждого образца составляло не менее 12-14 дней. Параметры эманлирования для всех материалов бетона, цемента, песка и щебня были определены в естественном состоянии при нормальной влажности.

Результаты и их обсуждения. В таблице 2 представлены расход материалов на один кубический метр тяжелого бетона и показаны расчетные средние значения удельной активности и удельной эффективной активности ЕРН.

Таблица 2. Показатели удельной и эффективной активности материалов с учетом их массового расхода.

Наименование материала	Ra-226, Бк/кг	K-40, Бк/кг	Th-232, Бк/кг	$A_{эфф}$, Бк/кг	Расход материалов, кг/м ³
Цемент	44,8	62,0	14,8	70,0	490
Песок	19,2	396	20,7	80,4	710
Щебень	19,0	488	26,0	94,5	1180
Бетонный образец	25,0	423	21,9	87,9	2380

Расчет удельной эффективной активности бетонного образца $A_{эфф}^{обр}$ производился с учетом массового вклада каждого из компонентов и значений их радиоактивности по формуле:

$$A_{эфф}^{обр} = A_{эфф}^{Ц} \cdot \frac{m_{Ц}}{\rho} + A_{эфф}^{П} \cdot \frac{m_{П}}{\rho} + A_{эфф}^{Щ} \cdot \frac{m_{Щ}}{\rho}, \quad (6)$$

где, $A_{эфф}^{Ц}$, $A_{эфф}^{П}$, $A_{эфф}^{Щ}$, $m_{Ц}$, $m_{П}$, $m_{Щ}$ - удельные эффективные активности, Бк/кг и расходы цемента, песка, щебня соответственно, кг/м³; ρ – средняя плотность бетона, кг/м³.

Подставив значения из таблицы 1 в уравнение (3), получим

$$A_{(эфф)}^{обр} = 70 \cdot \frac{490}{2380} + 80,4 \cdot \frac{710}{2380} + 94,5 \cdot \frac{1180}{2380} = 85,3 \text{ Бк/кг},$$

Сравнив расчетное значение, $A_{эфф}^{обр}$ с экспериментальным (табл. 2), получим отклонение расчетного значения от экспериментального на -3%.

На рисунке 1 представлен график накопления радона в герметичной ёмкости из пробы тяжелого бетона массой 11 кг естественной влажности.

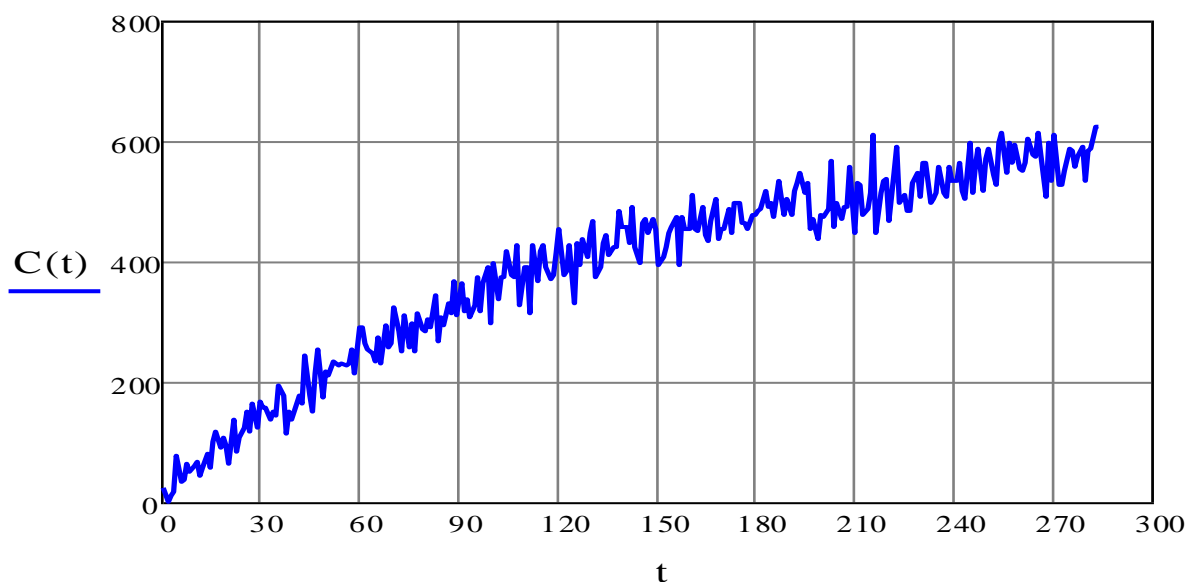


Рисунок 1 - График накопления радона в герметичной ёмкости.

На основе данных, представленных на рисунке 1, с помощью прикладной программы MathCAD рассчитывается эмануирующая способность и коэффициент эманирования по формулам (4, 5).

На графике, представленном на рисунке 2, видно, что равновесие между рождающимися в процессе распада радия атомами радона и выделяющимися в окружающую среду в условиях эксперимента наступает уже через 150-180 часов экспозиции пробы в герметичной емкости.

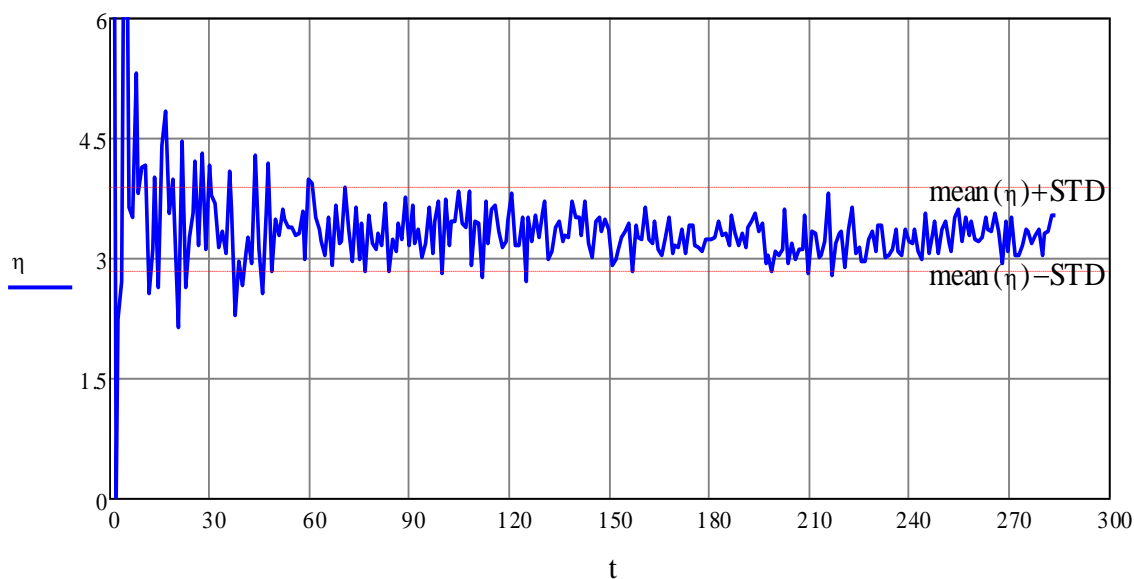


Рисунок 2 – Изменение величины эманлирующей способности.

В таблице 3 приведены результаты расчетов коэффициентов эманлирования, эманлирующей способности для компонентов тяжелого бетона.

Таблица 3 - Параметры эманлирования компонентов бетонной смеси

Название материала	Масса образцов, кг	Эманлирующая способность, Бк/кг	Коэффициент эманлирования, [-]	Стандартное отклонение коэффициента эманлирования, [-]
Цемент	5,0	0,54	0,012	0,002
Песок	5,0	2,48	0,124	0,012
Щебень	5,0	2,60	0,137	0,027
Бетон	11,0	3,75	0,123	0,021

Рассчитаем эманлирующую способность, $\eta^{обр}$ бетонного образца, аналогично коэффициенту удельной эффективной активности (6) по формуле:

$$\eta^{обр} = \eta^Ц \cdot \frac{m_Ц}{\rho} + \eta^П \cdot \frac{m_П}{\rho} + \eta^Щ \cdot \frac{m_Щ}{\rho}, \quad (7)$$

где, $\eta^Ц, \eta^П, \eta^Щ$ – эманлирующая способность цемента, песка, щебня соответственно, Бк/кг; $m_Ц, m_П, m_Щ$ – расход цемента, песка, щебня соответственно, кг; ρ – масса образца.

Подставив значения из таблицы 2 в уравнение (6), получим

$$\eta^{обр} = 0,54 \cdot \frac{495}{2380} + 2,48 \cdot \frac{710}{2380} + 2,60 \cdot \frac{1180}{2380} = 2,14 \text{ Бк/кг}$$

Сравнив расчетное значение, $\eta^{обр}$ с экспериментальными данными (табл. 3), получим отклонение расчетного коэффициента от экспериментального на 42,9 %.

В своей работе Э.М. Крисюк отметил, что «вывод о неизменности коэффициента эманлирования при приготовлении бетонов и многокомпонентных материалов скорее всего несправедлив для цемента и других мелкодисперсных

добавок» и если коэффициент эманирования цемента увеличить в 10 раз, то «...совпадение расчётных и измеренных значений значительно улучшится». Расчётная формула считается очевидной и в этих публикациях не приводится. Далее, он совершенно справедливо отмечает, что «...окончательный вывод о возрастании (примерно в 10 раз) коэффициента эманирования цемента и, возможно, золы при изготовлении бетонов можно дать только на основании прямых измерений...» [2]. В работе [1] представлены результаты многочисленных измерений эманирования у гидравлически активных материалов: цемента и высококальциевой золы до и после гидратации. Установлено, что цементный и зольный камень имеют коэффициенты эманирования на порядок больше, чем исходные цемент и зола. С учетом вышеизложенного расчетная эманирующая способность бетонного образца составила 3,15 Бк/кг, что на 16 % меньше экспериментально определенного значения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Назиров Р.А. Развитие научных основ и методов получения строительных материалов с заданными радиационно-экологическими свойствами: дис. ... докт. техн. наук. Красноярск, 2003. 500 с.
2. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. - М.: Атомиздат, 1989 - 120 с.
3. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах: Публикация 65 МКРЗ / Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1995. - 68 с.
4. Гулабянц Л.А., Лившиц М.И., Медведев С.В. Определение радоновой нагрузки на подземные ограждающие конструкции здания // АСADEMIA, Архитектура и строительство. 2016 №1. С.122-128
5. Кургуз С.А. Радонозащитные свойства лакокрасочных и рулонных материалов для покрытий бетонных конструкций: дис ... канд. техн. наук. Красноярск, 2003. 36 с.
6. 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.
7. Алексахин К.М., Гуськова А.К. 42-я сессия научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР 17-28 мая 1993 г.) ООН, Медицинская радиология и радиационная безопасность, 1995. №2.
 8. ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. (с Изменениями N 1, 2) М.: Госстрой России, 1995
 9. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009: Гигиенические нормативы. – М.: Центр санитар.-эпидемиолог. нормирования, гигиен. сертификации и экспертизы Минздрава России, 2009
 10. Павлов И.В., Покровский С.С., Камнев Е.Н. Способы обеспечения радиационной безопасности при разведке и добыче урановых руд. - М.: Энергоатомиздат, 1994. 256 с.
 11. Шашкин В.Л., Пруткина М.И. Эманирование радиоактивных руд и минералов. - М.: Атомиздат, 1979
 12. Шумкова Н.Н. Выделение радона из отдельностей рудного массива и кусков отбитой руды //Технический прогресс в атомной промышленности. Сер. Горно-металлургическое производство. М.: ЦНИИАтоминформ, №3,1992
 13. Удельная активность ^{222}Rn в воде. Методика выполнения измерений в применении Радиометра объемной активности радона-222 «AlphaGUARD Mod. PQ2000». – PT Positron Technology GmbH, 1998. – 41с.
 14. Бекман И.Н. РАДОН: ВРАГ, ВРАЧ и ПОМОЩНИК Курс лекций <http://profbeckman.narod.ru/rad.files/Rad3SS.pdf>
 15. Назиров Р.А., Экспериментальная оценка и сравнительный анализ эманирования материалов в воду воздух / Р.А. Назиров, А.А. Романова // **Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2010 №4 (44). – С.101–104**
 16. Методика выполнения измерений содержания естественных радионуклидов радия-226, тория-232, калия-40 и радионуклида цезия-137 в строительных

материалах и изделиях на сцинтилляционных спектрометрах типа TL 1309 (МКГ-1309) и МКС-АТ1315. Разработчик: Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ» . – М., – 20 с.

17. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс». – Менделеево, ВНИИФТРИ, 2005. – 23 с.

Назирова Рашит Анварович, д-р техн. наук, проф;

Сибирский федеральный университет (СФУ), г. Красноярск

Зайцева Наталья Александровна

Сибирский федеральный университет (СФУ), г. Красноярск

Веде Петр Юрьевич

E-mail: vede@live.ru

Сибирский федеральный университет (СФУ), г. Красноярск

Nazirov Rashit Anvarovich, DSc, Professor;

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Zaitseva Natalia Alexandrovna

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Vede Petr Yurevich

E-mail: vede@live.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

PREDICTING SPECIFIC EFFECTIVE ACTIVITY OF NATURAL RADIOACTIVITY AND EMANATING CAPACITY OF MULTICOMPONENT CONSTRUCTION MATERIALS

The paper presents the results of the study of a multicomponent building material - heavy concrete for determining the specific effective activity (A_{eff}) of natural radionuclides (NRN) and radon emanation into the air. An analysis of the results is made,

and a formula is proposed for calculating and predicting the natural radioactivity of a multicomponent material (for example, heavy concrete) on the basis of data on the natural radioactivity and weight composition of its components: cement, fine and coarse aggregate. The fundamental feasibility of obtaining reliable calculated values of the specific effective activity of multicomponent building materials based on cement is established. It is shown that the prediction of the emanation of multicomponent cement compositions by the additive law is not possible without taking into account the change in the increase in the emanation due to the hydration of the cement.

Key words: radiation safety, natural radioactivity, building materials, concrete, specific effective activity, emanation.

REFERENCES

1. Nazirov R.A. Razvitiye nauchnykh osnov i metodov polucheniya stroitel'nykh materialov s zadannymi radiatsionno-ekologicheskimi svoystvami [Development of scientific foundations and methods for obtaining building materials with given radiation-ecological properties]: dis ... d-r. tekhn. nauk. Krasnoyarsk, 2003. P 500 (**in Russian**)
2. Krisyuk E.M. Radiatsionnyy fon pomeshcheniy [Radiation background in buildings]. M, Atomizdat, 1989 - p 120 (**in Russian**)
3. MKRZ, 1994. Zashchita ot radona-222 v zhilykh zdaniyakh i na rabochikh mestakh. Publikatsiya 65 [ICRP, 1994. Protection against Radon-222 at Home and at Work.] Publikatsiya 65 MKRZ. - M.: Energoatomizdat [ICRP Publication 65. Ann.ICRP] 1995. 68 p
4. Gulabyanc L.A, Livshic M.I., Medvedev M.I. Opredeleniye radonovoy nagruzki na podzemnyye ograzhdayushchiye konstruksii zdaniya [The Measurement of Radon Impacts on Underground Building Envelope.] ACADEMIA, Arkhitektura i stroitel'stvo [Scientific journal «Academia. Architecture and construction»] 2016 No 1. Pp. 122-128 (**in Russian**)

5. Kurguz S.A. Radonozashchitnyye svoystva lakokrasochnykh i rulonnykh materialov dlya pokrytiy betonnykh konstruksiy [Radon-protective properties of paint and coating materials for coatings of concrete structures]: dis ... kand. tekhn. nauk, Krasnoyarsk, 2003. 36 p. **(in Russian)**
6. MU 2.6.1.2398-08 Radiatsionnyy kontrol' i sanitarno-epidemiologicheskaya otsenka zemel'nykh uchastkov pod stroitel'stvo zhilykh domov, zdaniy i sooruzheniy obshchestvennogo i proizvodstvennogo naznacheniya v chasti obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti [Radiation control and sanitary-epidemiological assessment of land plots for the construction of residential houses, buildings and facilities for public and industrial purposes in terms of ensuring radiation safety]. Russia, 2008 **(in Russian)**
7. Aleksakhin P.M., Gus'kova A.K. 42-ya sessiya nauchnogo komiteta po deystviyu atomnoy radiatsii (NKDAR 17-28 maya 1993 g.) OON, Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' [United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1993 Report to the General Assembly, with annexes], 1995. №2
8. GOST 30108-94. Materialy i izdeliya stroitel'nyye. Opredeleniye udel'noy effektivnoy aktivnosti yestestvennykh radionuklidov. (s Izmeneniyami N 1, 2) [Building materials and elements. Determination of specific activity of natural radioactive nuclei] M.: Gosstroy Rossii, 1995 **(in Russian)**
9. SanPiN 2.6.1.2523-09 Normy radiatsionnoy bezopasnosti NRB-99/2009: Gigiyenicheskiye normativy [Norms of Radioactive Safety NRS-99/2009], M.: Tsentr sanitarn.-epidemiolog. normirovaniya, gigiyen. sertifikatsii i ekspertizy Minzdrava Rossii, 2009 **(in Russian)**
10. Pavlov I.V., Pokrovskiy S.S., Kamnev Ye.N. Sposoby obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti pri razvedke i dobyche uranovykh rud [Methods to ensure radiation safety in uranium ore exploration and mining]. M.: Energoatomizdat, 1994. P 256. **(in Russian)**
11. Shashkin V.L., Prutkina M.I. Emanirovaniye radioaktivnykh rud i mineralov [On the mechanism of the emanation of radioactive ores and minerals]. M.: Atomizdat, 1979. **(in Russian)**

12. Shumkova N.N., Vydeleniye radona iz otchel'nostey rudnogo massiva i kuskov otbitoy rudy. Tekhnicheskiy progress v atomnoy promyshlennosti. Gorno-metallurgicheskoye proizvodstvo [(Isolation of radon from the ore deposit and some ore lumps of the fall. Technical progress in the nuclear industry. Ser. Mining and metallurgical production]. M.: TSNIIatominform, №3,1992 **(in Russian)**
13. Udel'naya aktivnost' ^{222}Rn v vode. Metodika vypolneniya izmereniy v primeneniye Radiometra ob'yemnoy aktivnosti radona-222 «AlphaGUARD Mod. PQ2000» [Specific activity of ^{222}Rn in water. The procedure for performing measurements using the Radon-222 volumetric activity radiometer «AlphaGUARD Mod. PQ2000 »], Germany PT Positron Technology GmbH, 1998. – 41p.
14. Bekman I.N. RADON: VRAG, VRACH i POMOSHCHNIK Kurs lektsiy [RADON: ENEMY, FRIEND OR ASSISTANT Course of lectures] <http://profbeckman.narod.ru/rad.files/Rad3SS.pdf> **(in Russian)**
15. Nazirov R. A., Romanova A.A. Eksperimental'naya otsenka i sravnitel'nyy analiz emanirovaniya materialov v vodu i vozdukh [Experimental assessment and a comparative analysis of material emanations into water and air] Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. [Scientific journal «Proceedings of Irkutsk State Technical University] **2010 No. 4 (44). Pp.101–104 (in Russian)**
16. Metodika vypolneniya izmereniy sodержaniya yestestvennykh radionuklidov radiya-226, toriya-232, kaliya-40 i radionuklida tseziya-137 v stroitel'nykh materialakh i izdeliyakh na stsintillyatsionnykh spektrometrakh tipa TL 1309 (MKG-1309) i MKS-AT1315 [Methods for measuring the content of radionuclides of natural radion-226, thorium-232, potassium-40 and cesium-137 in building materials and products on scintillation spectrometers as TL 1309 (MKG-1309) and MKS-AT1315], Razrabotchik: Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Atomeks» . – M., – 20 p. **(in Russian)**
17. Metodika izmereniya aktivnosti radionuklidov s ispol'zovaniyem stsintillyatsionnogo gamma-spektrometra s programmnyy obespecheniyem «Progress» [Procedure for measuring the activity of radionuclides using a scintillation gamma spectrometer with the "Progress" software], Mendeleyevo, VNIIFTRI, 2005. – 23 p. **(in Russian)**

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

УДК 699.887.32

Зайцева Н.А.,

магистр

Слабуха А.В.,

научный руководитель, проф., канд. архитектуры

Сибирский Федеральный Университет.

г. Красноярск, Российская Федерация

Проблема радона, как основа на пути к обеспечению радиационной безопасности населения в России.

Отечественные исследования природной радиоактивности строительных материалов с точки зрения влияния на здоровье человека начались в конце 1960-х гг. под руководством Э.М. Крисюка. В то время конкретные исследования влияния радиации, направленные на изучение прямого воздействия на организм человека досконально не проводились; лишь существуют упоминания, что радон, также как и радий, калий и торий, является тяжелым радиоактивным элементом периодической системы и присутствует в строительных материалах минерального происхождения, таких как гранитный щебень. [1]

Однако позже зарубежными учеными было доказано и подтверждено, что человек, находясь долгое время в искусственной среде, подвергается облучению за счет распада естественных радионуклидов так и, в основном, за счет распада радона, который приводит к росту онкологических заболеваний. Основным последствием облучения здорового человека радоном является увеличение частоты заболеваемости раком легких, трахеи и гортани с летальным исходом. Поэтому и очевидно насколько необходима и важна роль строительной отрасли в ограничении облучения населения природными источниками иони-

зирующего излучения. Благодаря трудам советских ученых А.Е. Ферсмана, В.Г. Хлопина, А.П. Виноградова, А.П. Кирикова и их несомненному вкладу в развитие физики и геоэкологии, в настоящее время тема радиоактивных строительных материалов весьма актуальна для жителей местностей, с повышенной естественной радиоактивностью минерального сырья.

Систематические исследования природной радиоактивности строительных материалов были начаты лишь в 70-е годы 20 века в Ленинградском институте радиационной гигиены, который в дальнейшем сформировал лабораторию природных источников дозиметрии Института радиационной гигиены им. профессора П.В. Рамзаева. [4] В эти же годы, наряду с определением природной радиоактивности строительного сырья, проводились теоретические, экспериментальные исследования внешнего облучения населения в зданиях различного назначения. Практическим результатом его работы является документ № 43-10/796 «Ограничение облучения населения от природных источников ионизирующего излучения. Временные критерии для организации контроля и принятия решений», введённый в действие в декабре 1990 г. в качестве республиканских санитарных правил. [2]

В качестве критерия оценки радиоактивности строительных материалов для их изготовления Э.М. Крисюком впервые была предложена величина «эффективная удельная активность природных радионуклидов» - как интегральная характеристика излучения природных радионуклидов в строительных материалах. Эта величина в дальнейшем послужила адекватной оценке радиационной безопасности населения в целом, став основой в классификации строительных материалов в методической рекомендации «Радиационно-гигиеническая оценка строительных материалов», утвержденных МЗ РСФСР в 1976 г. [2]

К важнейшим радиологическим характеристикам строительных материалов также относят процесс эманирования - процесс выделения радиоактивных изотопов в грунт, воду, в строительные материалы и в воздушную среду жилого помещения. В 70х годах важной задачей было установить факторы, влияющие на насыщение всех сред эманаии радиоактивными изотопами и дать количест-

венную оценку формирования активности этих изотопов в строительном сырье. Однако отсутствуют работы, связанные с оценкой влияния состава, свойств на параметры эманирования строительных материалов. Но в настоящее время наличие работ посвященных исследованию параметра эманирования, выполненных при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант № 07-05-01011) подтверждает актуальность данной тематики. [6]

Результаты исследований строительных материалов стали основой к работам санитарно - эпидемиологических нормативов, которые регламентирует соблюдение основных норм радиационной безопасности населения. В ведение нормативов по эффективной удельной активности природных радионуклидов в строительном сырье фактически можно считать началом систематических исследований по ограничению облучения населения за счет природных источников излучения в дальнейшем. [5]

Сейчас радиационную активность строительных материалов необходимо обследовать по нескольким критериям – по химическому составу сырья и содержанию в них радиоактивных изотопов тяжелых металлов. После обследования данных образцов на предмет радиоактивности, можно составить представление о радиационной опасности некоторых строительных материалов из природного камня. Далее, по сопоставлению данных о радиационной активности строительных материалов, приведенной в таблице 1, можно сделать основной вывод о радиоактивной природе некоторых горных пород и выяснить, какое сырье для изготовления бетонных, цементных смесей и вяжущих будет наиболее опасным для строительства зданий и дальнейшего проживания в них. [4]

Таблица 1 - Удельная активность ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th в вулканических, магматических и осадочных горных породах, и соответствующая мощность поглощенной дозы на высоте 1 м от поверхности земли [4]

Тип породы	Удельная активность, мБк/г			Мощность поглощенной дозы в воздухе, мкГр/г
	^{40}K	^{238}U	^{232}Th	
Граниты	1000	60	80	0,12
Диориты	700	20	30	0,06
Базальты	240	10	10	0,02
Известняки	90	30	7	0,02
Карбонаты	-	27	8	0,02
Песчаники	370	19	10	0,03
Сланцы	700	44	45	0,008

Опираясь на данные таблицы 1, можно сделать неутешительный вывод в пользу того, что практически вся архитектура советского союза основана на использовании в строительстве радиоактивного, в той или иной степени, строительного сырья и материалов, такие как граниты, сланцы и диориты. Из-за отсутствия в то время норм радиационной безопасности, отчуждения от науки других цивилизованных стран и систематических исследований, население Советского союза подвергалось длительным облучениям за счет распада естественных радиоизотопов, в том числе и радона, который приводит к излучению населения в будущем. И в подтверждение этого факта, статистические данные здравоохранения «РосСтат» указывают на рост онкологических заболеваний органов дыхания, у некурящий людей разного поколения. [7]

На основании имеющихся в отечественной литературе немногочисленных данных, к сожалению, приходится констатировать факт, что до настоящего времени целенаправленного изучения негативного влияния радиоактивности на здоровье человека не проводились, что свидетельствует об отсутствии в то

время единого подхода к нормам радиационной безопасности и отсутствию систематических исследований в данном направлении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. История становления лаборатории дозиметрии природных источников в Институте радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева: 1970–1986 гг. / Э.П. Лисаченко, И.П. Стамат, Н.А. Королева - Радиационная гигиена Том 9 № 1, 2016
2. Назиров, Р. А. Развитие научных основ и методов получения строительных материалов с заданными радиационно-экологическими свойствами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05; 25.00.36 / Назиров Рашит Анварович. – Красноярск, 2003. – 501 с.
3. Федеральные законы РФ «О радиационной безопасности населения» № 3-ФЗ от 09.01.96 г. и «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» № 52-ФЗ от 30.03.99г. [№ 3-ФЗ; № 52-ФЗ]
4. Пархоменко В.И. Радиоактивность различных строительных материалов, используемых в СССР// Радиационная гигиена.— Ленинград, 1980. — №9. — С. 22—24
5. НРБ – 99/2009 Нормы радиационной безопасности: Гигиенические нормативы. – М.: Центр санитар.-эпидемиолог. нормирования, гигиен. сертификации и экспертизы Минздрава России, 2009.
6. Микляев П.С. Исследование эманирования глинистых пород по радону / П.С. Микляев, Т.Б. Петрова // Геология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2010. – № 1. – С. 13–22.
7. Морозов В.Г. Оценка медицинского облучения населения в субъектах Российской Федерации / В.Г. Морозов, Р.К. Исмагилов, А.М. Мусин // Радиационная гигиена. – 2008. – Том 1, № 4. С. 41-44.

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

«13» 06 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Прогнозирование концентрации радона в проектируемых жилых бетонных
зданиях методом компьютерного моделирования»

тема

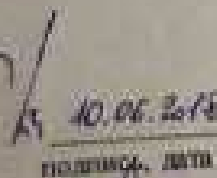
08.04.01 «Строительство»

код и наименование направления

08.04.01.04 «Проектирование зданий. Энерго- и ресурсосбережение»

код и наименование магистерской программы

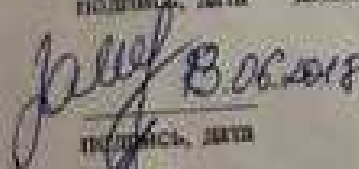
Научный руководитель


подпись, дата

доцент, канд. техн. наук
должность, ученая степень

И.В. Тарасов
инициалы, фамилия

Выпускник


подпись, дата

Н.А. Зайцев
инициалы, фамилия

Рецензент


подпись, дата

доцент, канд. техн. наук
должность, ученая степень

Е.Г. Плясун
инициалы, фамилия

Красноярск 2018