



На правах рукописи

Васильев Алексей Владимирович

**РАДОНОВАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ
МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ**

Специальность 05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и
городского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Жуковский Михаил Владимирович

Официальные оппоненты: **Яковлева Валентина Станиславовна**
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
доцент кафедры прикладной физики

Климшин Алексей Валерьевич
кандидат технических наук,
ФГБУН Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича
Уральского отделения РАН, научный сотрудник
лаборатории «Экологической геофизики»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Научно-исследовательский институт
строительной физики Российской академии
архитектуры и строительных наук»

Защита диссертации состоится «12» декабря 2014 г. в 14-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета ДМ 212.105.11, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия», по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал университета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на официальном сайте ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» <http://www.swsu.ru>.

Отзывы на автореферат направлять в диссертационный совет по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Автореферат разослан « » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент



Н.В. Бакаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

На протяжении последних десятилетий городская среда становится основой современной техногенной цивилизации. При этом возрастает не только степень техногенной нагрузки на окружающую среду городов, но и создаются условия для потенциально негативных воздействий возводимых и уже эксплуатируемых строительных объектов. Одним из таких потенциально негативных факторов, оказывающих непосредственное влияние на безопасную область обитания человека, является радиационное воздействие естественных источников излучения, в частности радона и его дочерних продуктов распада.

Радон повсеместно присутствует в атмосфере и является наиболее важным природным источником облучения. Наибольшие дозы облучения радоном относятся к пребыванию в помещениях зданий. При этом ущерб от облучения радоном связан с индуцированием рака легкого и преждевременной смертью от этого заболевания. Реализация принципа оптимизации радиационной защиты в ситуации облучения радоном осложняется тем, что целый ряд задач остаются нерешенными.

Базовые принципы, касающиеся обоснования и оптимизации радиационной безопасности, выработаны научным сообществом и сформулированы в рекомендациях Международной комиссии по радиологической защите, материалах Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и докладах Научного комитета по действию атомной радиации при Организации объединенных наций (НКДАР ООН). По данным НКДАР ООН радон обуславливает около половины общей дозы облучения населения от природных источников ионизирующего излучения. Принимая во внимание тот факт, что в среднем городской житель проводит почти 80% времени внутри помещений, необходимость уделять серьезное внимание проблеме защиты здоровья населения от воздействия радона в помещениях зданий является важнейшей задачей.

Согласно Федеральному закону «О радиационной безопасности населения», облучение населения, обусловленное радоном и продуктами его распада в жилых помещениях, не должно превышать установленные нормативы. Особенности конструкции и содержания зданий различного назначения приводят к существенно более высоким уровням объемной активности (концентрации) радона в воздухе помещений по сравнению с наружной атмосферой. В связи с этим в Нормах радиационной безопасности (НРБ-99/2009) содержатся требования по ограничению уровня среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности радона (ЭРОА) в жилых и общественных помещениях.

В последние годы значительное внимание уделяется проблеме облучения населения радоном в контексте мер по увеличению энергосбережения в строительстве. Снижение суммарного удельного годового расхода тепловой

энергии достигается применением соответствующих архитектурно-строительных решений, вследствие использования которых происходит снижение воздухопроницаемости ограждающих конструкций. В результате снижается кратность воздухообмена, и создаются условия для накопления радона в воздухе жилищ.

В России требования к энергосберегающему строительству были установлены государственными органами с 1996 года. В последующие годы были введены новые нормативы, регулирующие сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций, удельный расход тепла на отопление и другие параметры, направленные на увеличение энергосбережения. Установление новых норм привело к созданию условий, в которых уровни концентрации радона в современных зданиях оказались повышенными. Согласно результатам радонового обследования города Екатеринбурга, в квартирах современных зданий, построенных после 1990-го года, даже на верхних этажах, концентрации радона могут значительно превышать средний уровень концентрации радона в жилищах города.

Повышение накопления радона в результате снижения воздухообмена в современных зданиях показано во многих странах. Такая тенденция может привести к росту уровней облучения населения и увеличению заболеваемости и смертности от рака легкого в будущем. Среди специалистов выработалось общее мнение, что данная проблема требует неотложного детального рассмотрения. В отличие от европейских стран, США и Канады, актуальность проблемы потенциальной радоноопасности современных зданий в России в большей степени связана с многоэтажными городскими зданиями, для которых механизмы поступления и накопления радона недостаточно изучены. В связи с этим разработка способа оценки параметров поступления и стока радона, а также выявление определяющих факторов, влияющих на динамику концентрации радона в помещениях современных многоэтажных зданий, являются весьма актуальными задачами.

Целью диссертации является развитие теоретических основ и экспериментальных подходов к оценке параметров поступления и стока радона в помещениях зданий.

Задачи исследования:

1. Выявить зависимость концентрации радона в помещениях домов г. Екатеринбурга от архитектурно-строительных особенностей объектов строительства.
2. Разработать способ измерения скорости поступления радона, основанный на анализе динамики концентрации радона при переходе помещения из активного в стационарный режим эксплуатации.
3. Определить соотношения между диффузионным и конвективным потоками радона в помещении и оценить кратность воздухообмена в реальных условиях эксплуатации зданий с использованием радона в качестве естественного индикаторного газа.

4. Выявить основные факторы, определяющие повышенные концентрации радона в помещениях современных многоэтажных зданий.

Положения, выносимые на защиту:

1. Анализ динамики концентрации радона при переходе помещения из активного в стационарный режим эксплуатации позволяет определить скорость поступления радона.
2. Разработанный способ, основанный на изучении зависимости скорости поступления радона от разности температур между внутренним объемом помещения и наружной атмосферой, позволяет оценить соотношение диффузионного и конвективного потоков радона в помещении.
3. Радон может быть использован в качестве естественного индикаторного газа для определения кратности воздухообмена в штатных условиях эксплуатации помещений.
4. Высокие концентрации радона в современных зданиях вызваны доминированием диффузионного потока радона из ограждающих конструкций и низкой кратностью воздухообмена при эксплуатации помещений.

Научная новизна:

1. Разработаны новые способы оценки соотношения диффузионного и конвективного потоков радона и кратности воздухообмена в помещении, базирующиеся на анализе динамики концентрации радона при переходе помещения из активного в стационарный режим эксплуатации, и отличающиеся использованием радона в качестве естественного индикаторного газа.¹
2. На основании измерений кратности воздухообмена, проведенных разработанными способами, установлено, что высокая концентрация радона в современных многоэтажных зданиях обусловлена доминированием диффузионного потока радона из ограждающих конструкций и низкой кратностью воздухообмена при эксплуатации помещений.

Практическая значимость диссертационной работы:

1. Разработанный способ оценки соотношения диффузионного и конвективного потоков радона может быть использован для выбора оптимальных корректирующих мер по снижению повышенных концентраций радона в помещениях современных зданий.
2. Использование радона в качестве естественного индикаторного газа позволяет оценить динамику кратности воздухообмена помещения в реальных условиях эксплуатации здания.

¹ Способ определения доминирующего механизма поступления радона в помещение: пат. 2508526 Рос. Федерация. № 2011142707/28 ; заявл. 21.10.2011 ; опубл. 27.02.2014 Бюл. № 6. 9 с.

3. Установленные взаимосвязи между уровнями концентрации радона с такими параметрами, как средняя кратность воздухообмена эксплуатируемого помещения и удельная активность радия-226 в строительных материалах, могут быть использованы при подготовке справочной и нормативной документации.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и симпозиумах: 13th IRPA Congress, (Glasgow, Scotland, 2012), EU-NORM 1st International Symposium (Tallinn, Estonia, 2012), 11th International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping (Prague, Czech Republic, 2012), IV семинар «Применение изделий из ячеистого бетона автоклавного твердения» (Екатеринбург, 2012), XIII Международный экологический симпозиум «Урал атомный, Урал промышленный» (Екатеринбург, 2012), Научно-практическая конференция «Современный автоклавный газобетон» (Краснодар, 2013), 7th International Conference on Protection Against Radon at home and at Work (Prague, Czech Republic, 2013), Second East European Radon Symposium (Niš, Serbia, 2014), 8th International Conference on High Levels of Natural Radiation and Radon Areas (Prague, Czech Republic, 2014).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 15 научных работ (в том числе 7 статей в научных журналах из перечня ВАК, 1 статья в других изданиях, 7 публикаций в материалах российских и международных конференций); получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы из 118 наименований. Общий объем – 116 страниц, включая 54 иллюстрации и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ существующего состояния проблемы облучения населения радоном в жилых помещениях. Приведены предпосылки к изучению проблемы облучения населения радоном в жилых помещениях в контексте мер по увеличению энергосбережения в строительстве. Рассмотрены основные механизмы поступления и стока радона в помещении.

Поступление радона обусловлено комплексом причин, а именно наличием: источников поступления, путей проникновения и движущей силы. Источниками радона принято считать объекты, из которых радон поступает в помещения. Образовавшийся при распаде радия в грунтовом основании здания и ограждающих конструкциях радон способен мигрировать из порового пространства в открытый воздух и накапливаться внутри помещений. Другими менее значимыми источниками могут служить наружный воздух и вода.

Рассматриваемые в работе многоэтажные здания могут быть описаны с помощью многокамерной модели, в которой основным источником радона

являются ограждающие конструкции здания. Грунт для многоэтажных зданий будет являться значимым источником только для первых этажей, что подтверждается результатами радоновых обследований жилищ Свердловской области. Из грунта под зданием и ограждающих конструкций радон мигрирует по порам, трещинам и воздушным полостям. Происходящие при этом процессы обусловлены наличием градиента концентрации радона в среде и градиента давления. В первом случае формируется процесс диффузионного переноса, во втором – конвективного или фильтрационного.

При условии отсутствия в грунтовом основании сквозных трещин, а также элементов с крупными воздушными полостями, диффузионный перенос радона является основным. Однако недостаточная плотность квартирных дверей может приводить к формированию процессов, обуславливающих конвективный перенос радона между соседними квартирами. Таким образом, конвективный механизм поступления будет далее рассматриваться как макроперенос радона из граничащих помещений.

Конвективная составляющая поступления радона не поддается прямой оценке. Измерение плотности потока радона из ограждающих конструкций также представляет определенную сложность. Таким образом, необходимость инструментального определения скорости поступления радона продиктована сложностью или невозможностью прямой оценки поступлений радона, обусловленных диффузионным и конвективным потоками. Определение соотношения между потоками радона вытекает в отдельную задачу, по причине необходимости применения различных инженерных мер по уменьшению поступления радона в помещения.

Факторами, приводящими к стоку радона, являются вентиляция и радиоактивный распад. На практике кратность воздухообмена (КВО) много больше постоянной распада, поэтому воздухообмен является определяющим фактором, приводящим к снижению концентрации радона.

Традиционные методы оценки КВО используют индикаторные газы и аэродвери. Существенными недостатками данных методов являются их трудоемкость и сложность использования для определения КВО в условиях штатного режима эксплуатации помещений, в связи с чем особый интерес вызывает использование радона в качестве естественного индикаторного газа.

В первой главе по результатам анализа существующего состояния проблемы облучения населения радоном сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена исследованию концентраций радона в помещениях современных зданий (построенных с применением энергосберегающих технологий) на примере г. Екатеринбурга, Свердловской области.

Исследование было проведено на основании совместного анализа данных радонового обследования г. Екатеринбурга, проведенного Институтом промышленной экологии УрО РАН в 2007-2008 гг., и результатов

дополнительных измерений, проведенных в рамках настоящей работы. Общее количество объектов радонового обследования составило 430 помещений многоквартирных домов (по одному помещению в каждом доме).

Для проведения измерений использовались интегрирующие методы с использованием твердотельных трековых детекторов альфа-частиц. Данные методы рекомендованы НКДАР ООН и ВОЗ для проведения национальных и региональных радоновых обследований.

На основании анализа полученных результатов была построена диаграмма, демонстрирующая зависимость концентрации радона в жилищах города от года постройки здания (Рисунок 1). Согласно полученной зависимости, наблюдается значительный рост концентрации радона в помещениях современных зданий (построенных после 2000 года). Такая тенденция может привести к росту уровней облучения населения и увеличению заболеваемости и смертности от рака легкого в будущем.

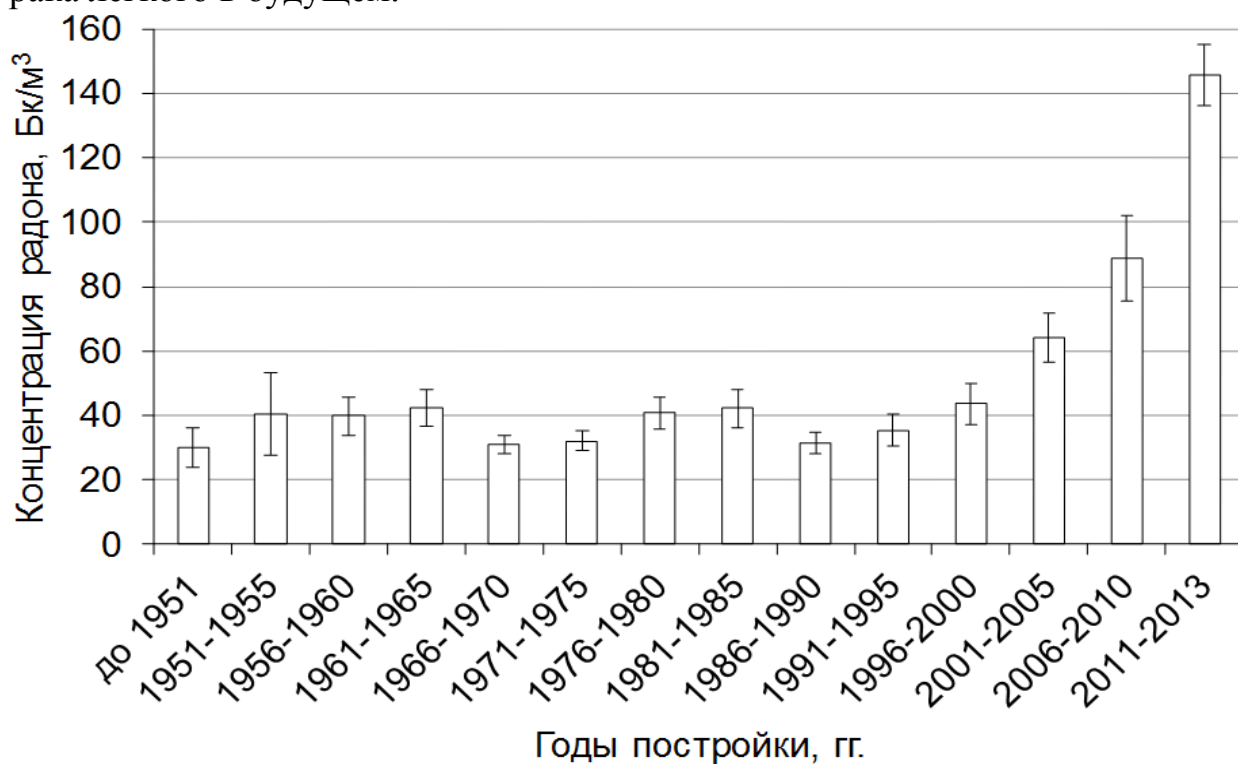


Рисунок 1 – Зависимость концентрации радона в помещениях домов г. Екатеринбурга от года постройки дома (указаны средние значения и стандартные ошибки).

Увеличение концентраций радона в помещениях современных зданий связано с новыми технологиями строительства, определенными в контексте исследования типом ограждающих конструкций. При этом концентрации радона в помещениях современных зданий более чем в два раза превышают концентрации радона в зданиях, построенных до введения требований к энергосбережению.

Задача снижения неприемлемых уровней риска требует в первую очередь уменьшения концентрации радона в помещениях с его высоким содержанием. Однако сама по себе оценка концентрации радона в помещениях не дает

полного представления о применимости тех или иных противорадоновых мер. Корректирующие меры будут эффективны только при достоверной информации о механизмах и путях поступления радона, поэтому необходим способ оценки характерных параметров, определяющих концентрации радона в помещении.

В третьей главе описана суть и теоритическая основа решения задачи определения соотношения между потоками радона (диффузионным и конвективным) и оценки характерных параметров, определяющих концентрации радона в помещении. Приведена формулировка и решение уравнения для временной зависимости концентрации радона для квазистационарных и нестационарных состояний эксплуатации помещения.

Суть разработанного подхода к определению потоков и параметров поступления радона заключается в непрерывном измерении концентрации радона и разности температур снаружи и внутри помещения с шагом в один час. Такие условия проведения измерений необходимы для отслеживания динамики концентрации радона при переходе помещения из активного режима эксплуатации (при активной деятельности человека в помещении) в стационарное состояние (когда люди покидают помещение в конце рабочего дня или ложатся спать).

Накопление радона для стационарного режима эксплуатации помещения представляет собой процесс с выходом на насыщение. При этом выход значения концентрации радона в помещении на равновесие определяется некоторыми постоянными параметрами (скоростью поступления радона и КВО). Для оценки данных параметров необходимо математически описать процесс изменения концентрации радона во времени.

Исследования, посвященные поступлению радона в помещения зданий, традиционно опираются на различного рода математические модели. Это обусловлено в первую очередь тем, что сложность определения реального поступления радона в конкретные здания не позволяет проводить экспериментальные измерения всех необходимых параметров. Временная зависимость концентрации радона $A(t)$ в помещении может быть представлена в виде дифференциального уравнения первого порядка (предполагается, что радон перемешивается мгновенно по всему объему помещения):

$$\frac{dA(t)}{dt} = S(t) - (A(t) - A_{Rn}^{atm}) \cdot \lambda_v(t) - (A(t) - A_{Rn}^{atm}) \cdot \lambda_{Rn}, \quad (1)$$

где функция $S(t)$ описывает суммарное удельное поступление радона в единичный объем помещения (скорость поступления), Бк/(м³·ч); $\lambda_v(t)$ – функция, описывающая зависимость значения КВО от времени, ч⁻¹; $\lambda_{Rn} = 0,00755$ ч⁻¹ – постоянная распада радона; A_{Rn}^{atm} – концентрация радона в наружном воздухе, Бк/м³.

Суммарная скорость поступления радона S_0 в определенный момент времени обусловлена двумя основными механизмами: диффузионным и конвективным:

$$S_0 = S_D + S_C, \quad (2)$$

где S_D и S_C соответственно скорости диффузионного и конвективного поступления радона в помещение, Бк/(м³·ч).

Диффузионный механизм поступления радона подробно рассмотрен в работах Э.М. Крисюка. Для описания скорости диффузионного поступления радона, S_D , вводят в рассмотрение плотность потока радона (скорость эксхалляции радона) q , так что:

$$S_D = \frac{\sum_j q_j \cdot \Pi_j}{V}, \quad (3)$$

где q_j – скорость эксхалляции радона с j -ой поверхности, Бк/(м²·с), площадь которой равна Π_j , м²; V – объем помещения, м³.

Скорость эксхалляции радона связана непосредственно с удельной активностью радия-226 в строительном материале:

$$q = C_{Ra} \rho E \sqrt{\frac{\lambda_{Rn} D_e}{\varepsilon}} \operatorname{th} \left(d \sqrt{\frac{\lambda_{Rn} \varepsilon}{D_e}} \right), \quad (4)$$

где C_{Ra} – удельная активность радия-226 в материале слоя, Бк/кг; ρ – плотность материала, кг/м³; E – коэффициент эманирования радона; D_e – коэффициент диффузии в материале слоя, м²·с⁻¹; ε – пористость материала; d – половина толщины слоя материала, м.

Базовый подход к описанию скорости конвективного поступления радона в помещение основывается на простой аналогии потока, вызванного разностью давлений. В этом случае скорость конвективного поступления радона, S_C , описывается формулой:

$$S_C = A_C \frac{\Delta P}{R_C} V^{-1}, \quad (5)$$

где A_C – концентрация радона в конвективном потоке воздуха, Бк/м³; ΔP – разность давлений, обуславливающая конвективный поток, Па; R_C – общее сопротивление конструкции здания поступлению конвективного потока воздуха, Па·ч·м⁻³. Параметры в правой части уравнения непосредственно зависят от того, какая среда или пространство является источником конвективного потока воздуха. Это может быть подпольное пространство под зданием или другое помещение.

Более детальные модели конвективного механизма поступления радона в помещение основываются на введении в рассмотрение специфических параметров, характеризующих конкретные свойства здания и климатические условия. Так, в рамках модели, используемой в Финском Центре радиационной и ядерной безопасности, разность давлений в почвенном воздухе и в помещении на уровне пола связывается с разностью температур в помещении T_{in} и в наружной атмосфере, T_{out} и уровнем нейтрального давления H_{npl} (Neutral

Pressure Level), на котором достигается равенство давлений внутри и снаружи здания. Тогда:

$$\Delta P = \rho_0 \cdot g \cdot H_{npl} \cdot \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}}, \quad (6)$$

где ρ_0 – плотность воздуха при нормальном давлении, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

В моделях, предложенных в Лаборатории Лоуренса Беркли, ключевыми характеристиками здания выступают эффективная площадь натекания $\Pi_{нат}^{эфф}$ и площадь натекания радона $\Pi_{нат}^{Rn}$. Эффективная площадь натекания $\Pi_{нат}^{эфф}$ показывает площадь открытых участков в оболочке здания, через которые воздух может поступать или выходить из здания. Введение и широкое использование параметра $\Pi_{нат}^{эфф}$ тесно связано с тем, что была создана и отработана экспериментальная процедура его измерения при помощи нагнетательной двери (аэродвери). По аналогии с эффективной площадью натекания, для описания конвективного переноса радона в здание используется такое понятие, как площадь натекания радона $\Pi_{нат}^{Rn}$. Согласно данной модели скорость конвективного поступления радона S_C , обусловленная эффектом дымовой трубы (стек-эффектом), может быть выражена через площадь натекания радона $\Pi_{нат}^{Rn}$ и показатель степени n_r , зависящий от аэродинамических характеристик мест инфильтрации и эксфильтрации воздуха в здании:

$$S_C = A_C \cdot \Pi_{нат}^{Rn} \cdot v_0 \cdot \left(\frac{\Delta \rho g H}{P_0} \right)^{n_r} V^{-1}, \quad (7)$$

где H – высота здания, а разность плотностей воздуха $\Delta \rho = \rho_0 \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}}$ определяется через разность температур внутри и снаружи здания, v_0 – скорость инфильтрации воздуха, связанная с величиной давления P_0 , м/с .

Теоретические представления и экспериментальные данные о связи скорости поступления радона с разностью температур $\Delta T = T_{in} - T_{out}$ позволяют предложить способ определения вклада диффузионного и конвективного потока радона в помещении на основании изучения зависимости концентрации радона от ΔT .

В силу того, что конвективный поток радона в помещении определяется разностью температур ΔT , при $\Delta T = 0$ вклад этого механизма в суммарную скорость поступления можно исключить. Поэтому скорость поступления радона S_0 при $\Delta T=0$ будет соответствовать скорости диффузионного поступления радона. Зависимость скорости поступления радона в помещение S_0 для различных разностей температур ΔT позволяет установить доминирующий поток радона – диффузионный, при отсутствии зависимости скорости

поступления радона от ΔT , или конвективный, соответствующий значительному росту скорости поступления радона с ростом ΔT . При этом, вклад диффузионного потока радона в помещении может быть определен как отношение скорости поступления радона при нулевой разности температур к скорости поступления радона при средней заданной разности температур ΔT_{cp} :

$$M, \% = \rho_0 \frac{S_0(0)}{S_0(\Delta T_{cp})} \cdot 100\% . \quad (8)$$

В свою очередь общее решение уравнения для временной зависимости концентрации радона в помещении может быть представлено в виде уравнения:

$$A(t) = e^{-\int \lambda_v(t) dt'} \int S(t) e^{\int \lambda_v(t) dt'} dt + A_0 \cdot e^{-\int \lambda_v(t) dt'} . \quad (9)$$

При этом в пределах суточных измерений значение скорости поступления радона не претерпевает существенных изменений во времени. Таким образом, для характерного периода, необходимого для получения кривой накопления радона, изменение суммарной скорости поступления будет определяться исключительно разностью температур ΔT .

Если теперь предположить, что КВО постоянна, что соответствует стационарному режиму эксплуатации, то решение уравнения для временной зависимости концентрации радона может быть записано в виде:

$$A(t) = \frac{S_0}{\lambda_0} + (A_0 - \frac{S_0}{\lambda_0}) \cdot e^{-\lambda_0 t} , \quad (10)$$

Полученное уравнение описывает процесс накопления радона в квазистационарном состоянии. В реальности активная деятельность человека в помещении приводит к изменениям КВО. Процесс накопления активности не достигает своего насыщения и не всегда выходит в стационарное состояние, поэтому представляет интерес описание временных рядов концентрации радона в действующих помещениях для получения реальных соотношений между режимами воздухообмена. В этом случае процесс изменения КВО во времени удобно описать при помощи функции Хэвисайда. При этом решение уравнения примет более сложный вид:

$$A(t) = \frac{1}{6} e^{-\lambda_0 t} (W - e^{-2kt} (W - 1))^{\lambda/2k} \cdot (S_0 \lambda_0^2 t^3 + 3S_0 \lambda_0 t^2 + S_0 \lambda t^2 (W - 1) \cdot (2kWt - 2\lambda_0 t + \lambda t(W - 1) - 3) + 6S_0 t + 6A_0 e^{-\lambda \cdot N} \cdot W^{-\lambda/2k}) , \quad (11)$$

где $W = (e^{2N} + 1)^{-1}$.

Полученные уравнения могут быть использованы для описания участков временного ряда концентрации радона, характеризующих переходы помещения из активного в стационарный режим эксплуатации. Для выделения таких

участков перехода из общего массива экспериментальных данных был разработан программный алгоритм (Рисунок 2).

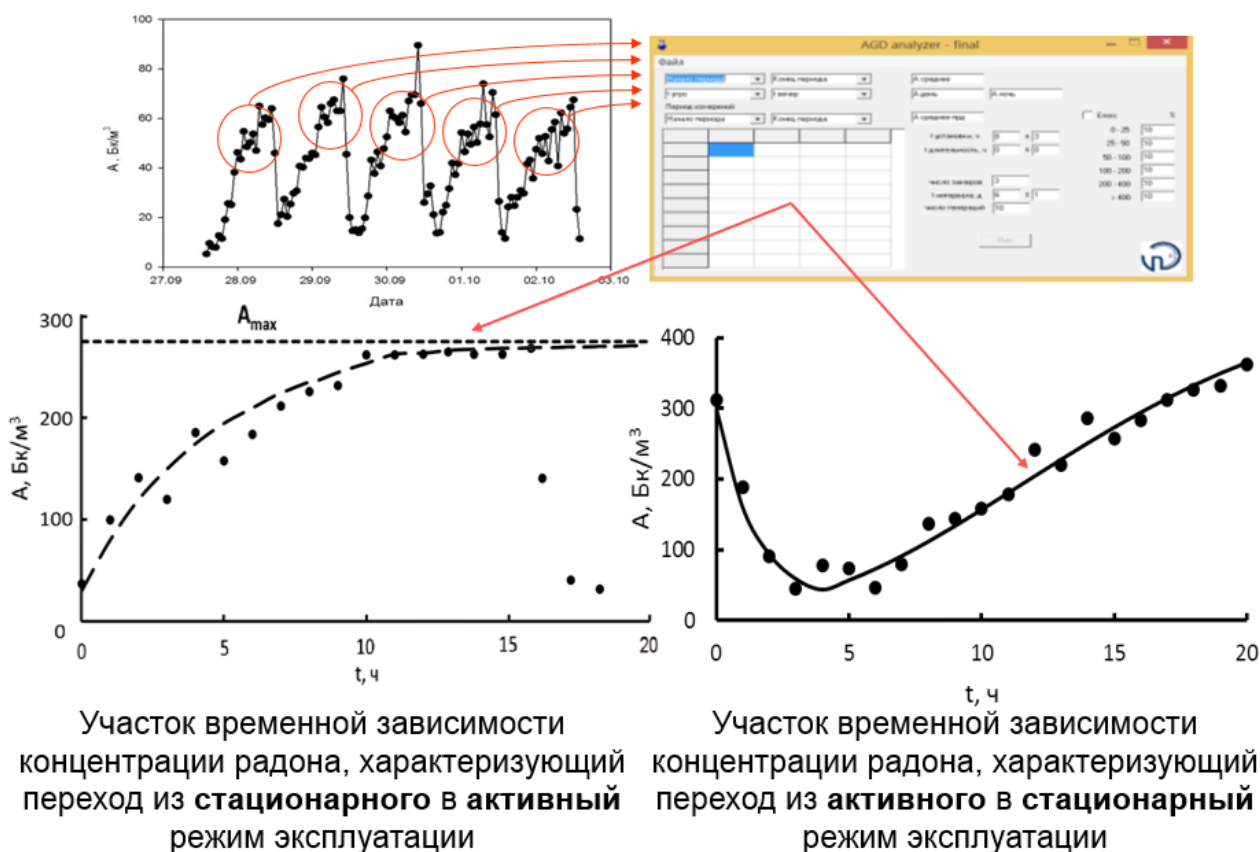


Рисунок 2 – Программа для определения участков перехода между режимами эксплуатации.

Каждая из кривых изменения концентрации радона может быть задана нелинейной регрессионной моделью, на основании оценки параметров которой могут быть получены основные интересующие параметры: суммарная скорость поступления радона и КВО в стационарном и активном режимах эксплуатации.

В четвертой главе продемонстрированы результаты апробации способов определения соотношения диффузионного и конвективного потоков радона и оценки параметров воздухообмена на основе показанного решения.

Продолжительные измерения концентрации радона были проведены в 14 помещениях различного назначения: в восьми квартирах многоэтажных зданий и четырех помещениях зданий офисного типа. Для проведения измерений был использован радон-монитор AlphaGUARD, позволяющий проводить непрерывные измерения концентрации радона, атмосферного давления и температуры в помещении. В среднем период измерений составил 5-6 месяцев, включая летний и зимний сезоны. Никаких ограничений на эксплуатацию помещений не налагалось.

Характеристики помещений и период измерений приведены в таблице 1. Исследование механизмов и параметров поступления радона было проведено в 12 помещениях (1-12, Таблица 1). В двух помещениях (13-14, Таблица 1) с

уровнями концентраций радона, не превышающими 20 – 30 Бк/м³, выявить какие-либо закономерности не представлялось возможным, поэтому в дальнейшем они не анализировались. С другой стороны, проведение каких-либо корректирующих и профилактических мер для снижения воздействия радона в таких помещениях с точки зрения решения санитарно-гигиенической проблемы нецелесообразно.

Таблица 1.

Характеристики помещений и период измерений.

№	Осн. материал ограждающих и несущих конструкций, год пост-ки	Этаж измерения / этажность	Период измерения и количество зарегистрир. данных	Среднее значение концентрации радона, Бк/м ³
помещения офисного типа				
1	кирпич, 1970-е гг.	1/2	21.10.2004-23.06.2005 результатов - 5105	133
2	кирпич, 1950-е гг.	2/3	11.08.2010-29.12.2010 результатов - 3355	57
3	кирпич, 1950-е гг.	1/3	25.07.2012-23.12.2012 результатов - 3620	76
4	газобетонные блоки, после 2005	2/2	15.08.2012-14.01.2013 результатов - 3646	107
жилые помещения в многоквартирных домах				
5	кирпич, после 2000	1/5	08.01.2011-01.06.2011 результатов - 3438	62
6	монолит, 2007	17/25	27.06.2010 - 28.01.2011 результатов - 2237	193
7	монолит, газобетонные блоки, 2010	6/10	24.01.2012 - 14.08.2012 результатов - 4838	143
8	монолит, 2012	13/16	21.01.2013 - 24.07.2013 результатов - 4404	203
9	монолит, газобетонные блоки, 2012	3/16	11.01.2013 - 01.08.2013 результатов - 4842	173
10	монолит, 2007	3/24	01.07.2011 - 22.12.2011 результатов - 4164	120
11	монолит, 2003	7/10	22.06.2011 - 26.12.2011 результатов - 4477	48
12	монолит, 2002	4/16	28.02.2009 - 28.04.2009 результатов - 1426	50
13	кирпич, 1989	6/14	01.12.2011-31.05.2012 результатов - 3347	17
14	панельный, 1978	7/9	07.03.2012 - 31.05.2012 результатов - 2030	24

Для каждого из помещений было проанализировано от 30 до 60 суточных кривых изменения концентрации радона, соответствующих различным разностям температур ΔT .

Вид экспериментальной кривой изменения концентрации радона представлен на рисунке 3.

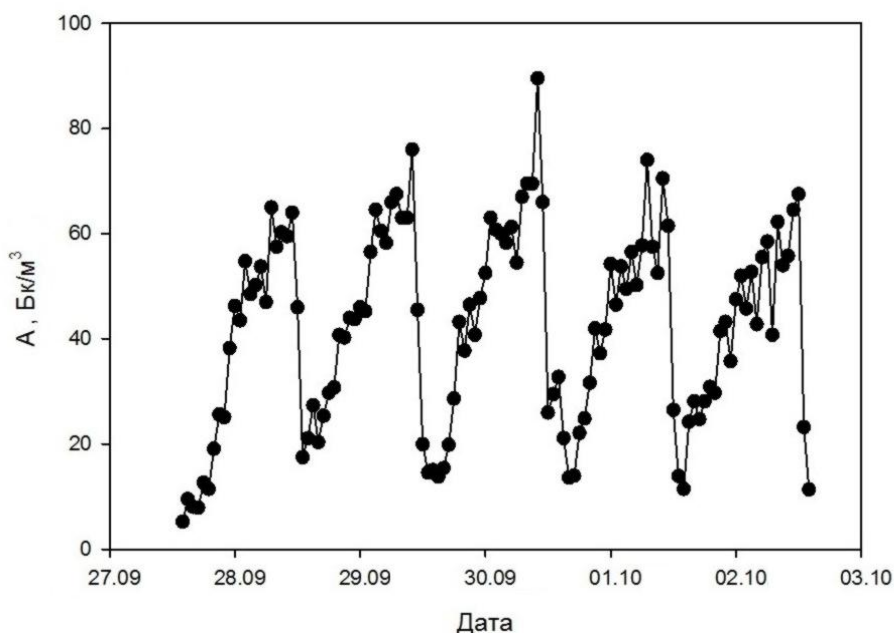


Рисунок 3 – Пример временного ряда изменения концентрации радона в одном из исследованных помещений (помещение 1).

Все параметры поступления и накопления радона в обследованных помещениях, полученные на основании разработанного подхода, приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Параметры поступления и накопления радона в обследованных помещениях.

№	$S_0 \pm \text{станд.ош.}, \text{ Бк/м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$	$\lambda_0 \pm \text{станд.ош.}, \text{ ч}^{-1}$	Вклад диффузионного поступления $\pm \text{станд.ош.}$	Среднее значение концентрации, Бк/м^3
помещения офисного типа				
1	33±1	0,25±0,01	0,91±0,04	133
2	7±1	0,09±0,01	0,85±0,18	57
3	23±1	0,24±0,02	0,58±0,05	76
4	35±2	0,24±0,02	0,58±0,12	107
жилые помещения в многоквартирных домах				
5	15±1	0,17±0,01	0,33±0,08	62
6	42±3	0,22±0,01	0,64±0,08	193
7	33±1	0,16±0,01	0,92±0,03	143
8	38±2	0,09±0,01	0,75±0,08	203
9	63±4	0,20±0,02	0,59±0,09	173
10	38±2	0,20±0,02	0,86±0,07	120
11	21±1	0,16±0,01	0,65±0,08	48
12	18±1	0,23±0,01	-*	50

* – период измерений в данном помещении был недостаточен для определения зависимости скорости поступления S_0 в широком диапазоне ΔT .

Оцененные значения скорости поступления радона были сгруппированы по температурным интервалам. Такие зависимости приведены на рисунке 4 для

помещений с максимальным и минимальным вкладом диффузионного поступления.

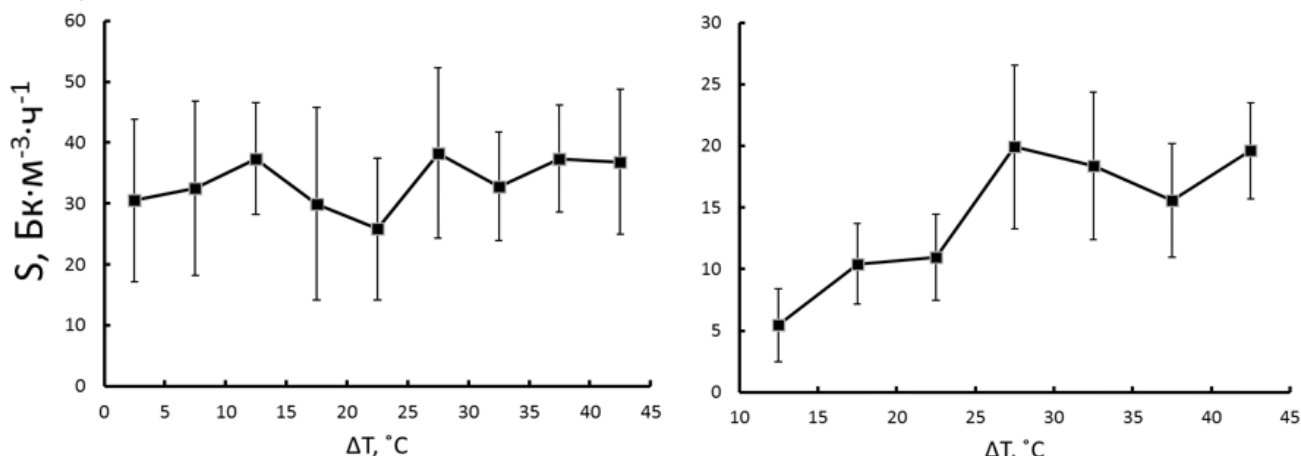


Рисунок 4 – Зависимость скорости поступления радона в помещение от разности температур ΔT для помещений 1 (слева) и 5 (справа).

Так для первого помещения скорость поступления радона остается практически неизменной. Во втором помещении, напротив, наблюдается рост скорости поступления, что свидетельствует о значительном вкладе конвективного потока. Учитывая расположение этого помещения на 1 этаже, причиной данного эффекта может быть дополнительное конвективное поступления из подвального помещения с высокой концентрацией радона.

Значения КВО в стационарном режиме эксплуатации были также сгруппированы по температурным интервалам. Согласно полученным результатам средний уровень КВО в стационарном режиме эксплуатации составляет величину порядка $0,2 \text{ ч}^{-1}$, что хорошо согласуется с оценками, полученными на основании теоретического моделирования и экспериментальных оценок (Рисунок 5).

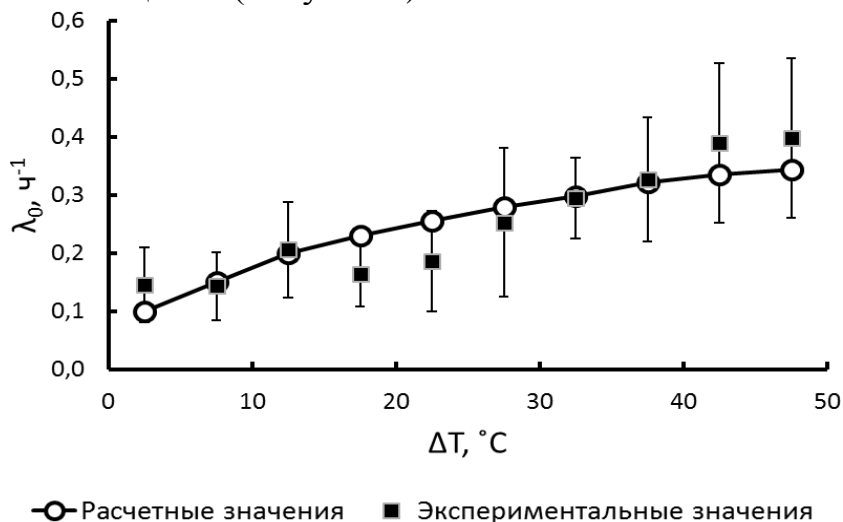


Рисунок 5 – Сравнение теоретического и экспериментального вида зависимостей кратности воздухообмена λ_0 от ΔT (на примере помещения 1).

Средний уровень концентрации радона в современных зданиях (6-10, Таблица 2) более чем в три раза превышает средний уровень концентрации

радона в зданиях города Екатеринбурга, построенных до введения требований к энергосбережению. Также в этих помещениях получены максимальные значения скорости поступления радона, и основная часть поступлений обусловлена диффузионным переносом из порового пространства материалов ограждающих конструкций.

Для установления причин повышенных концентраций радона в помещениях современных зданий, в сотрудничестве с одним из крупнейших застройщиков города Екатеринбурга, были проведены лабораторные исследования радиационных характеристик строительных материалов. Согласно полученным результатам, удельная активность (УА) радия в современных строительных материалах соответствует типовым значениям для материалов, используемых в регионе. Однако прямой зависимости между УА и скоростью поступления радона нет, поскольку скорость поступления также зависит от конкретной внутренней структуры материала. Причины высоких концентраций радона в современных зданиях нужно искать в режимах эксплуатации помещений и характеристиках ограждающих конструкций, таких как коэффициенты диффузии радона, коэффициенты эманирования и пористость строительных материалов.

В пятой главе проведено исследование влияния режима содержания помещений и характеристик строительных материалов на концентрации радона.

Описание структуры временной зависимости концентраций радона и метеорологических параметров в обследованных помещениях проводилось при помощи автокорреляционных функций и спектрального анализа на основании преобразования Фурье. Анализ, проведенный в помещениях различного назначения, подтвердил предположение о существенном влиянии режима содержания помещения на концентрации радона. Так, например, в зависимости концентраций радона от времени прослеживается суточный период. Причем пики на кривой изменения концентрации радона для офисного помещения в целом соответствуют участкам провалов для жилого помещения. Автокорреляционная функция для концентрации радона в помещении проявляет четкую суточную периодичность. Также проявляется период равный 7 дням, соответствующий рабочей неделе. Во всех помещениях жилого типа в явном виде присутствует период равный 12 часам, который не наблюдается для помещений офисного типа. Наличие периода такого рода может свидетельствовать о дополнительных факторах воздействия со стороны человека на интенсивность воздухообмена помещения, поэтому процесс изменения концентрации радона во времени для таких помещений не может быть описан с позиции квазистационарных состояний. На практике активная деятельность человека приводит к значительным изменениям в направлениях движения потоков воздуха и КВО в помещении.

Для установления средних уровней КВО были произведены дополнительные расчеты для помещений современных зданий 6-10 (Таблица 1).

Средние значения были получены на основании оценок КВО в активном и стационарном режимах эксплуатации. Для регрессионного анализа использовались ранее полученные для помещений 6-10 (Таблица 2) значения суммарной скорости поступления радона S_0 и стационарной КВО λ_0 .

Типичные зависимости КВО от разности температур ΔT для помещений современных зданий показаны на рисунке 6.

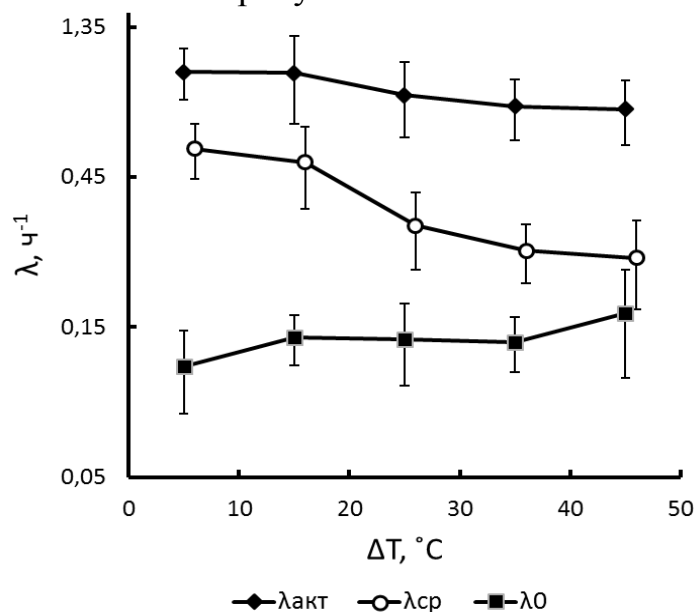


Рисунок 6 – Зависимость КВО от ΔT для активного $\lambda_{акт}$, стационарного λ_0 режима эксплуатации помещения (на примере помещения 9).

Нижний график на рисунке 6 представляет зависимость КВО от ΔT для стационарного режима эксплуатации помещения, верхний – для активного. График, проходящий между ними, соответствует зависимости средней КВО. Характер изменения средней КВО свидетельствует о хорошем проветривании помещений в теплый период года и практически полном закупоривании зимой.

Полученные параметры воздухообмена в обследованных помещениях современных зданий приведены в Таблице 3.

Таблица 3.

Параметры воздухообмена в обследованных помещениях.

№	$\lambda_0 \pm \text{станд. ош.}, ч^{-1}$	$\lambda_{акт} \pm \text{станд. ош.}, ч^{-1}$	$\lambda_{ср} \pm \text{станд. ош.}, ч^{-1}$
6	0,22±0,01	1,44±0,06	0,32±0,06
7	0,16±0,01	0,83±0,04	0,40±0,05
8	0,09±0,01	0,80±0,03	0,26±0,03
9	0,20±0,02	1,14±0,05	0,52±0,05
10	0,20±0,02	0,70±0,02	0,35±0,03

Согласно полученным результатам, значение КВО существенно зависит от режима эксплуатации помещения. Среднее значение КВО в стационарном режиме эксплуатации по всем обследованным помещениям ниже $0,2 ч^{-1}$, при этом КВО в активном режиме эксплуатации достигает величин $\sim 1,5 ч^{-1}$ со средним по всей выборке $0,87 ч^{-1}$. Полученные значения $\lambda_{ср}$ для обследованных

помещений хорошо согласуются с оценками, полученными при помощи моделирования воздухообмена в помещениях на основании воздухопроницаемости ограждающих конструкций.

Для проверки того, что наблюдаемые при натурных измерениях средние значения концентрации радона могут быть полностью обусловлены диффузионным переносом радона, было проведено моделирование в двух помещениях. Помещение А – в отдельном двухэтажном здании, специально построенном на территории предприятия Атомстройкомплекс для изучения влияния различных параметров на характеристики энергосбережения. Помещение Б – в современном многоэтажном здании с характерными параметрами (Таблица 4).

Таблица 4.

Характеристики моделируемых помещений.

Характеристика	Помещение А	Помещение Б
Этажность, основной материал стен и плит перекрытия	2-х этажное, газозолобетон	10 этажное, монолитный бетон
Этаж измерения	2	6
Средняя КВО±станд.ошибка, ч ⁻¹	0,31±0,02	0,40±0,04
Средняя скорость поступления радона±станд.ошибка, Бк/м ³ ·ч ⁻¹	35±2	33±1
Вклад диффузионного поступления±станд.ошибка	0,58±0,12	0,92±0,03
Средняя концентрация радона за период измерений, Бк/м ³	107	143
Расчётная концентрация, Бк/м ³	60	130

Полученные различия в расчетных и экспериментальных значениях концентрации радона для Помещения А могут быть обусловлены дополнительным конвективным поступлением радона из складского неэксплуатируемого помещения первого этажа, на что указывает более низкий процентный вклад диффузионного поступления. Для Помещения Б расчетное значение хорошо соответствует экспериментально измеренному. Таким образом, расчет согласуется с предположением о доминирующем диффузионном потоке радона из строительных материалов.

Далее был проведен анализ влияния различных характеристик строительных материалов и режима содержания помещения на уровни концентрации радона. В процессе моделирования варьировались такие параметры как коэффициент диффузии радона в строительных конструкциях (в диапазоне $1 \cdot 10^{-8} \div 4 \cdot 10^{-4}$ м²/с), коэффициент эманирования (0,16 ÷ 0,28), пористость (0,05 ÷ 0,75) и КВО (0,1 ÷ 0,8 ч⁻¹). В результате моделирования было получено, что основной вклад в изменчивость концентрации радона обусловлен изменениями КВО. Следующий за ним параметр, но имеющий существенно меньшее влияние, – коэффициент эманирования. На рисунке 7 приведена зависимость ЭРОА радона от КВО с учетом изменчивости остальных параметров в указанных диапазонах.

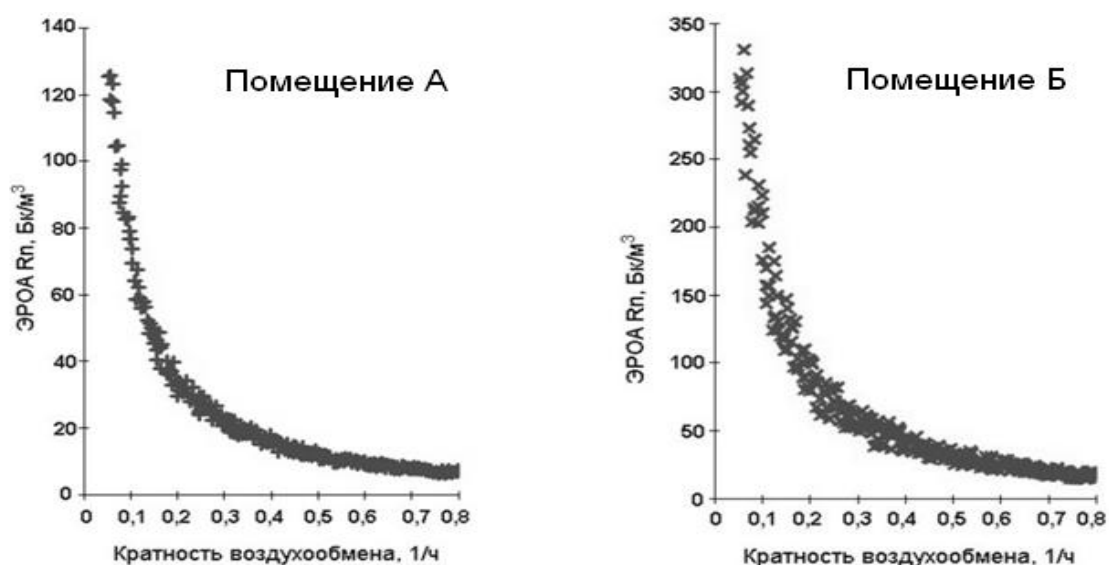


Рисунок 7 – Зависимость ЭРОА радона от КВО с учетом изменчивости характеристик строительных материалов.

Таким образом, даже при соблюдении требований к УА строительных материалов, концентрации радона в помещениях могут быть высокими и в ряде случаев превышать санитарные нормативы. Согласно результатам моделирования, при низкой КВО (менее $0,2 \text{ ч}^{-1}$), обусловленной высокой герметизацией зданий, в помещении, построенном преимущественно из тяжелого бетона (со средним уровнем УА радия-226 порядка $50\text{-}60 \text{ Бк/кг}$), наблюдается превышение нормативного уровня ЭРОА радона 100 Бк/м^3 .

На основании проведенного анализа было получено, что основной вклад в увеличение концентрации радона обусловлен низкой КВО, которая может быть вызвана отсутствием организованного притока наружного воздуха при эксплуатации помещений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Уровень концентрации радона в помещениях современных зданий более чем в 2 раза превышает среднюю концентрацию радона в многоэтажных домах г. Екатеринбурга, построенных до введения требований к энергосберегающему строительству. Увеличение количества зданий современной постройки способствует повышению среднего уровня концентрации радона, что противоречит концепции планомерного снижения облучения населения.

2. Разработан и опробован способ измерения скорости поступления радона, основанный на анализе динамики концентрации радона при переходе помещения из активного в стационарный режим эксплуатации.

3. Определены соотношения между диффузионным и конвективным потоками радона и произведена оценка кратности воздухообмена в реальных условиях эксплуатации помещений с использованием радона в качестве естественного индикаторного газа.

4. Показано, что процесс изменения концентрации радона во времени в реально эксплуатируемых помещениях не может быть описан с позиции квазистационарных состояний.

5. Установлено, что высокая концентрация радона в современных многоэтажных зданиях обусловлена доминированием диффузионного потока радона из ограждающих конструкций и низкой кратностью воздухообмена при эксплуатации помещений. При низкой кратности воздухообмена (менее $0,2 \text{ ч}^{-1}$), обусловленной высокой герметизацией зданий, в помещениях современных зданий, даже при соблюдении требований к удельной активности строительных материалов, может наблюдаться превышение нормативного уровня эквивалентной равновесной объемной активности радона в 100 Бк/м^3 , который должен быть обеспечен при проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения.

6. Норматив по удельной активности естественных радионуклидов в строительных материалах $A_{\text{эфф}}=370 \text{ Бк/кг}$ не обеспечивает выполнения нормативных требований к концентрациям радона в помещениях современных зданий. Согласно результатам моделирования, содержание радия-226 в строительных материалах в условиях применения энергосберегающих технологий не должно превышать величину порядка 100 Бк/кг .

Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях:

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. *Васильев, А.В.* Определение механизмов и параметров поступления радона в помещение [Текст] / Жуковский М.В., Васильев А.В. // Научно-информационный журнал по радиационной безопасности «АНРИ». – 2012, № 1. – С. 3-12.

2. *Vasilyev A.V.* Determination of mechanisms and parameters which affect radon entry into a room [Text] / Vasilyev A.V., Zhukovsky M.V. // Journal Environmental Radioactivity. – 2013, № 124. – P. 185-190.

3. *Васильев, А.В.* Строительные материалы как источник радона в зданиях, построенных по современным технологиям [Текст] / Васильев А.В., Жуковский М.В. и др. // Научно-технический и производственный журнал «Строительные материалы». – 2013, № 4. – С. 104-109.

4. *Vasilyev A.V.* Mechanisms and sources of radon entry in buildings constructed with modern technologies [Text] / Zhukovsky M.V., Vasilyev A.V. // Radiation Protection Dosimetry. – 2014, № 160 (1-3). – P. 48-52.

5. *Васильев, А.В.* Проблема облучения радоном в современных многоэтажных зданиях [Текст] / Васильев А.В. // Научно-технический журнал «Строительство и реконструкция». – 2014, № 4 (54). – С. 37-44.

6. *Vasilyev A.V.* Indoor radon problem in energy efficient multi-storey buildings [Text] / Yarmoshenko I.V., Vasilyev A.V. et al. Radiation Protection Dosimetry. – 2014, № 160 (1-3). – P. 53-56.

7. *Васильев, А.В.* Изменение кратности воздухообмена как мера снижения облучения населения радоном в городских жилищах, построенных с использованием современных технологий [Текст] / Васильев А.В.,

Ярмошенко И.В., Жуковский М.В. // Научно-информационный журнал по радиационной безопасности «АНРИ». – 2014, № 3. – С. 13-21.

Публикации в других изданиях

1. *Vasilyev A.V.* Measurements of Radon Entry Parameters in The Buildings [Text] / Zhukovsky M.V., Vasilyev A.V. // Proceedings of the 13th IRPA Congress, Glasgow. – 2012. – P. 1287.

2. *Vasilyev A.V.* Building materials as a dominant radon source in modern buildings [Text] / Vasilyev A.V., Zhukovsky M.V. // Proceedings of the EU-NORM 1st International Symposium Tallinn, Estonia. – 2012. – P. 161-169.

3. *Васильев, А.В.* Исследование механизмов и источников поступления радона в здания, построенные по современным технологиям [Текст] / Васильев А.В., Жуковский М.В. и др. // Научно-технический журнал «Стройкомплекс Среднего Урала». – 2012, № 12. – С. 21-24.

4. *Васильев, А.В.* Определение механизмов и параметров поступления радона в помещения [Текст] / Васильев А.В., Жуковский М.В. и др. // «Применение изделий из ячеистого бетона автоклавного твердения», сборник докладов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. – 2012. – С. 4-13.

5. *Васильев, А.В.* Закономерности поступления и накопления радона в зданиях, построенных по современным технологиям с применением ячеистого бетона [Текст] / Васильев А.В., Жуковский М.В. и др. // «Современный автоклавный газобетон», сборник докладов, Краснодар. – 2013. – С. 56-62.

6. *Vasilyev A.V.* Mechanisms and Sources of Radon Entry in Buildings Constructed with Modern Technologies [Text] / Vasilyev A.V., Zhukovsky M.V. // 7th International Conference on Protection Against Radon, Prague. – 2013. – P. 77.

7. *Vasilyev A.V.* Indoor Radon Problem in Energy Efficient Multi-Storey Buildings [Text] / Yarmoshenko I.V., Vasilyev A.V. et al. // 7th International Conference on Protection Against Radon, Prague. – 2013. – P. 76.

8. *Vasilyev A.V.* Building materials as a dominant radon source in modern buildings [Text] / Vasilyev A. V., Yarmoshenko I. V., Zhukovsky M. V. // Proceedings of the Second East European Radon Symposium. Niš : Faculty of Electronic Engineering. – 2014. – P. 31-34.

Патенты

Пат. № 2508526 Рос. Федерация. МПК G01F1/00. Способ определения доминирующего механизма поступления радона в помещение [Текст] / Жуковский М.В., *Васильев А.В.*; заявитель и патентообладатель ФГБУН Институт промышленной экологии УрО РАН. – 2011142707/28; заявл. 21.10.2011; опубл. 27.02.2014, Бюл. № 6. – 9 с.

Подписано к печати 07.10.2014 г. Формат 60x84/16
Объем 1,0 усл. п.л., Тираж 100 экз. Заказ № _____.

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет»
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94