



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ

На правах рукописи

Васильев Алексей Владимирович

**РАДОНОВАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ
МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ**

Специальность 05.23.19 – “Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства”

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук
М.В. Жуковский

Екатеринбург – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	4	
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	6	
ВВЕДЕНИЕ	8	
Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ..... 14		
1.1. Радон и его источники	14	
1.2. Состояние проблемы облучения радоном в современных городских жилищах	16	
1.3. Механизмы поступления и стока радона в помещениях зданий.....	18	
1.3.1. Поступление радона	18	
1.3.2. Сток радона.....	20	
Выводы	23	
Глава 2. КОНЦЕНТРАЦИИ РАДОНА В ПОМЕЩЕНИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ЗДАНИЙ..... 25		
2.1. Материалы и методы.....	25	
2.1.1. Радоновое обследование г. Екатеринбурга	25	
2.1.2. Радиационные характеристики современных строительных материалов.....	29	
2.2. Концентрации радона в помещениях зданий, построенных до 2001 г.....	33	
2.3. Концентрации радона в помещениях современных зданий	37	
Выводы	40	
Глава 3. СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ РАДОНА И ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХООБМЕНА		41
3.1. Суть и теоретическая основа подхода.....	41	
3.2. Реализация математического решения.....	47	

Выводы	52
Глава 4. МЕХАНИЗМЫ И ПАРАМЕТРЫ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДОНА В ПОМЕЩЕНИЯХ	53
4.1. Аппаратура измерений и характеристика экспериментальных объектов..	53
4.2. Определение вклада диффузионного и конвективного потоков радона, и оценка параметров поступления	56
4.3. Анализ полученных результатов	73
Выводы	74
Глава 5. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА СОДЕРЖАНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ НА КОНЦЕНТРАЦИИ РАДОНА	75
5.1. Характер и периодичность изменения концентрации радона в помещении	75
5.2. Определение параметров воздухообмена в реальных условиях эксплуатации помещений	86
5.3. Исследование влияния различных параметров на концентрации радона в модельных помещениях.....	92
5.4. Анализ полученных результатов	96
Выводы	99
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	100
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	102
Приложение 1. Средняя и максимальная удельная активность материалов, используемых для строительства в мире	115
Приложение 2. Блок-схема алгоритма определения переходов между режимами эксплуатации помещения	116

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- A – объемная активность (концентрация) радона в воздухе помещения, Бк/м³;
- A_{Rn}^{atm} – концентрация радона в наружном воздухе, Бк/м³;
- A_c – концентрация радона в конвективном потоке воздуха, Бк/м³;
- λ_v – кратность воздухообмена в помещении, ч⁻¹;
- λ_0 – кратность воздухообмена при стационарном режиме эксплуатации помещения, ч⁻¹;
- λ – кратность воздухообмена в помещении, обусловленная деятельностью человека, ч⁻¹;
- $\lambda_{акт}$ – кратность воздухообмена в активном режиме эксплуатации помещения ($\lambda_{акт} = \lambda + \lambda_0$), ч⁻¹;
- λ_{Rn} – постоянная распада радона равная 0,00755 ч⁻¹;
- C_{Ra} – удельная активность радия-226 в материале слоя, Бк/кг;
- d – половина толщины слоя материала, м;
- D_e – коэффициент диффузии в материале слоя, м²·с⁻¹;
- E – коэффициент эманирования радона;
- ε – пористость материала;
- F – коэффициент равновесия;
- f_{sr} – стек-параметр, м·с⁻¹·(°C)^{-1/2};
- f_{wr} – безразмерный ветровой параметр;
- H_{npl} – уровень нейтрального давления, на котором достигается равенство давлений внутри и снаружи здания, Па;
- Π – площадь поверхности ограждающей конструкции, м²;
- $\Pi_{нат}^{эфф}$ – эффективная площадь натекания, м²;
- $\Pi_{нат}^{Rn}$ – площадь натекания радона, м²;
- q – плотность потока радона от поверхности, Бк/(м²·с);
- ρ_0 – плотность воздуха при нормальном давлении, кг/м³;

- ρ – плотность материала, кг/м³;
- R_C – общее сопротивление конструкции здания поступлению конвективного потока воздуха, Па·с·м⁻³;
- σ_{LN} – стандартное отклонение логарифма величины;
- S_0 – суммарное удельное поступление радона в единичный объем помещения (скорость поступления радона), Бк/(м³·ч);
- S_D – скорость диффузионного поступления радона в помещение, Бк/(м³·ч);
- S_C – скорость конвективного поступления радона в помещение, Бк/(м³·ч);
- ΔP – разность давлений, обуславливающая конвективный поток, Па;
- T_{in} – температура в помещении, °С;
- T_{out} – температура в наружной атмосфере, °С;
- ΔT – разность температур между внутренним объемом помещения и внешней атмосферой, $\Delta T = T_{in} - T_{out}$, °С;
- v_0 – скорость инфильтрации воздуха, м/с;
- v – метеорологическая скорость ветра, м/с;
- V – объем помещения, м³.

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения;
- КВО – кратность воздухообмена;
- НКДАР ООН – Научный комитет по действию атомной радиации при Организации объединенных наций;
- ОА – объемная активность;
- СПМ – спектральная плотность мощности;
- УА – удельная активность;
- ТД – трековый детектор;
- ЭРОА – эквивалентная равновесная объемная активность.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Активность радона (Бк) – количество актов естественного радиоактивного распада ядер радона за 1 с; активность радона равна произведению количества атомов радона и постоянной распада λ_{Rn} .

Активный режим эксплуатации помещения – режим содержания помещения при активной деятельности человека.

Диффузионный механизм поступления радона – перенос атомов из порового пространства материала, обусловленный наличием градиента концентрации в среде.

Дочерние продукты радона – семейство короткоживущих изотопов, образующихся в процессе распада радона.

Конвективный механизм поступления радона – перенос макромассы вещества в газе из воздушных полостей и других помещений, обусловленный внешними силами.

Коэффициент диффузии радона (m^2/c) – величина, выражающая активность радона, прошедшего в результате диффузии через $1 m^2$ площади слоя толщиной 1 м за 1 с при разности объемных активностей на поверхностях слоя 1 Бк/ m^3 .

Коэффициент равновесия – отношение ЭРОА к ОА газообразного радона, т.е. отношение удельной потенциальной энергии альфа-излучения фактической смеси продуктов распада радона к той величине, которая соответствует радиоактивному равновесию.

Коэффициент эманирования радона – отношение активности радона, находящегося в поровом пространстве, к его общей активности в материале.

Кратность воздухообмена – отношение объема воздуха, подаваемого в помещение или удаляемого из него в течение единицы времени к объему помещения.

Объемная активность радона (Бк/м³) – активность радона, равномерно распределенного в объеме 1 м³ (концентрация, выраженная в единицах активности).

Пористость – доля объема сухого материала, заполненная воздухом.

Противорадоновые меры – технические мероприятия, предпринятые с целью снижения содержания радона и его дочерних продуктов в воздухе помещения.

Риск – вероятность некоего исхода (например, возникновения рака легкого).

Скорость поступления радона Бк/(м³·ч) – удельное поступление радона в единичный объем помещения за 1 ч.

Стационарный режим эксплуатации помещения – режим содержания помещения при отсутствии людей или со сведенным к минимуму возможным влиянием человека на направления движения потоков воздуха и интенсивность воздухообмена внутри помещения.

Фильтрационный механизм поступления радона – перенос макромассы вещества из порового пространства материала в среде, обусловленный внешними силами.

Эквивалентная равновесная объемная активность (Бк/м³) – объемная активность газообразного радона в равновесии с его короткоживущими дочерними продуктами, которая имела бы такую же удельную потенциальную энергию альфа-излучения, как и существующая неравновесная смесь.

Эффект дымовой трубы (стек-эффект) – движение воздуха или другого газа в вертикальном ограждении (канале, дымовой трубе, здании), вызываемое разностью между плотностью нагреваемого воздуха внутри ограждения и плотностью окружающей атмосферы.

ВВЕДЕНИЕ

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» [1], 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) [2] 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 (КВО), и создаются условия для накопления радона в воздухе жилищ.

В России требования к энергосберегающему строительству были установлены государственными органами с 1996 года [3]. 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 [4].

Повышение накопления радона в результате снижения воздухообмена в современных зданиях показано во многих странах [5-12]. 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.

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.
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.

Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Радон и его источники

Радон-222 – наиболее долгоживущий изотоп радона с периодом полураспада $T_{1/2} = 3,82$ суток, входящий в состав радиоактивного семейства урана-238 и образующийся в результате распада изотопа радия-226. Радон-222 дает основной вклад в формирование дозовой нагрузки населения, короткоживущие изотопы радона – ^{220}Rn (торон, $T_{1/2} = 54,5$ сек.) и – ^{219}Rn (актион, $T_{1/2} = 3,9$ сек.) вносят в формирование дозовой нагрузки суммарно менее 10% от вклада всех изотопов радона [13]. В дальнейшем под радоном будет пониматься изотоп ^{222}Rn .

Практически во всех зданиях концентрации радона значительно выше, чем в атмосферном воздухе. Этот эффект обусловлен рядом причин, главная из которых – наличие в непосредственной близости от здания или в нем самом радия-226, при распаде которого образуется радон [14].

Первые результаты измерений концентрации радона в жилищах, включавшие в себя 225 домов в Швеции, были опубликованы еще в 1956 году [15]. Указанное исследование показало достаточно высокие уровни концентраций радона в некоторых домах, построенных из бетона, содержащего радий-226. Тогда мировое сообщество не уделило полученным результатам должного внимания, полагая, что это являлось локальной шведской проблемой. Однако впоследствии данное исследование дало толчок к тому, чтобы в большинстве стран были проведены исследования по оценке концентраций радона в помещениях зданий, которые затем были обобщены в докладах НКДАР ООН [16].

Источниками радона принято считать объекты, из которых радон поступает в помещения. Образовавшийся в грунтовом основании здания и ограждающих конструкциях, изготовленных из материалов на основе нерудных горных пород,

радон способен мигрировать из порового пространства в открытый воздух и накапливаться внутри помещений. Другими, менее значимыми, источниками радона могут служить наружный воздух и вода, подаваемая в здание из артезианских скважин [13,14,16].

Основным источником поступающего в помещения радона считается грунтовое основание здания [16]. Даже при обычных удельных активностях радия-226 концентрация радона в поровом пространстве грунтового основания составляет десятки килобеккерелей на кубометр.

Строительные материалы считаются менее существенным, но, тем не менее, достаточно значимым источником радона. С введением многочисленных мер, направленных на снижение потребления энергии и приводящих к созданию условий накопления радона в воздухе помещений, оценке содержания радия-226 в строительных материалах стало уделяться повышенное внимание [18-21]. В условиях очень низкой КВО концентрация радона во внутреннем воздухе может намного превысить нормированный уровень даже при небольших поступлениях только от внутренних ограждающих конструкций [13].

Концентрация радона в наружном воздухе обычно не превышает 12 Бк/м³ [16], поэтому поступление радона вместе с наружным воздухом в помещения зданий, для которых радон является санитарно-гигиенической проблемой, незначительно. В свою очередь, согласно данным Агентства по охране окружающей среды США, удельной активности радона в воде в 10 Бк/кг соответствует увеличение концентрации радона в воздухе на 1 Бк/м³ [17]. При этом согласно НРБ-99/2009 допустимая удельная активность радона в источниках питьевого водоснабжения не должна превышать 60 Бк/кг. Вследствие этого, повышенное содержание радона в воде, используемой для бытовых нужд, потребует принятия каких-либо мер гораздо раньше, чем обусловленная использованием этой воды концентрация радона в помещении достигнет допустимых НРБ-99/2009 значений (для ЭРОА радона 200 Бк/м³ или для концентрации газообразного радона 400 Бк/м³ [2]).

1.2. Состояние проблемы облучения радоном в современных городских жилищах

На строительство и эксплуатацию зданий в развитых странах расходуется около половины всей энергии, в развивающихся – примерно треть [22-24]. Так в России на строительство (включая эксплуатацию) тратится примерно 40–45% всей вырабатываемой энергии, что делает энергосбережение в строительной отрасли чрезвычайно актуальным [25]. Расширение площадей застройки и связанное с этим увеличение энергетических потребностей приводит к дальнейшему росту потребления энергии. Данная тенденция не будет ослабевать до истощения ресурсов или экономического спада, поэтому регуляторами будут предлагаться новые меры по энергосбережению.

Требования к энергосберегающему строительству были установлены Федеральном законом № 3-ФЗ «Об энергосбережении» [3] с 1996 г. В соответствии с законом, Приказом Министерства регионального развития РФ № 224 от 17 мая 2011 года определены требования энергетической эффективности зданий, строений и сооружений [26]. Согласно Приказу № 224, требования энергоэффективности определяются нормируемым показателем суммарного удельного годового расхода тепловой энергии здания на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение. По отношению к базовому уровню этот показатель должен поэтапно уменьшаться: на 15% со дня вступления в силу требований, на 30% – с 1 января 2016 года, на 40% – с 1 января 2020 года.

В работе [25] отмечается, что основные потери в типовом многоквартирном жилом здании приходятся на горячее водоснабжение (47%) и на нагрев инфильтрующегося воздуха (31%). Теплотери через ограждающие конструкции (стены, окна, крышу и пр.) составляют около 22%. Именно здесь находятся основные резервы энергосбережения.

На практике снижение суммарного удельного годового расхода тепловой энергии достигается применением соответствующих архитектурно-

строительных решений, направленных на повышение энергосбережения, таких, как специальные требования к планировке, применение монолитных бетонных и железобетонных конструкций в сочетании с использованием эффективных утеплителей, герметичных стеклопакетов, внешних изоляционных панелей и др.

Известно [27], что половина потребляемой тепловой энергии на системы обеспечения микроклимата составляет расход на подогрев поступающего воздуха, поэтому, применение одних только окон малой воздухопроницаемости (согласно [28] не более $6 \text{ кг/ч}\cdot\text{м}^2$) приводит к значительной экономии. С другой стороны, снижение воздухопроницаемости существенно уменьшает поступление приточного воздуха вследствие чего естественный гравитационный напор не в состоянии обеспечить необходимый воздухообмен [11,29].

Применение современных строительных решений приводит к снижению КВО помещений и созданию условий для накопления радона в воздухе жилищ [5-12]. Так, например, в работе [12], на основании радоновых обследований проведенных на территории США (выборка составила 578 жилищ), было установлено, что концентрации радона в жилищах, построенных с использованием энергосберегающих технологий, оказываются повышенными.

Тенденция к увеличению концентраций радона в помещениях зданий может привести к росту уровней облучения населения и увеличению заболеваемости и смертности от рака легкого в будущем. Задача снижения неприемлемых уровней риска требует в первую очередь уменьшения концентраций радона, в помещениях с его высоким содержанием. Однако сама по себе оценка концентрации радона в помещениях не дает полного представления о том, какие противорадоновые меры приведут к снижению уровней концентрации радона. Корректирующие меры будут эффективны только при достоверной информации об источниках, механизмах и путях поступления радона.

1.3. Механизмы поступления и стока радона в помещениях зданий

Концентрация радона внутри помещения есть результат двух основных конкурирующих процессов: поступления радона и его стока.

1.3.1. Поступление радона

Поступление радона обусловлено комплексом причин, а именно наличием: источников поступления радона, путей проникновения и движущей силы, побуждающей радон поступать в помещение.

Известно, что основными источниками поступления радона являются грунт под зданием и строительные материалы. Из грунта под зданием и строительных материалов 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 (перенос газа в газе) или фильтрационного (перенос газа в пористой среде) [13].

Рассматриваемые в работе многоэтажные здания могут быть описаны с помощью многокамерной модели, в которой основным источником радона являются ограждающие конструкции здания. Однако наличие незащищенных устьев туннелей подвода коммуникаций, и недостаточная плотность квартирных дверей могут приводить к формированию конвективных процессов, обуславливающих перенос радона из квартир нижних этажей и подвальных помещений [30]. Поэтому в данной работе конвективный механизм поступления радона будет рассматриваться как макроперенос радона в помещение не из грунтового основания здания, а из граничащих с ним помещений, в том числе подвального типа.

В докладах НКДАР ООН [16] отмечается, что конвективная составляющая поступления радона не поддается прямой оценке. Она может быть определена

только косвенно, на основании разности величины суммарного поступления радона и его диффузионной составляющей.

Способы оценки диффузионного поступления из грунтового основания зданий достаточно хорошо проработаны [13,31]. При условии отсутствия в грунтовом основании и граничащих с грунтом ограждающих конструкциях здания сквозных трещин и швов, а также элементов с крупными воздушными полостями диффузионный перенос радона является основным [13]. В свою очередь измерения плотности потока радона из ограждающих конструкций представляют определенную сложность [18,32-39]. Используемые для таких измерений накопительные камеры и угольные адсорберы требуют предотвращения утечки радона из накопительной камеры, что далеко не всегда представляется возможным. Такие условия измерений требуют дополнительной экспериментальной оценки влияния фактора утечки радона из накопительной камеры, а также компоненты, обусловленной встречным диффузионным потоком радона из объема накопительной камеры.

Таким образом, необходимость инструментального определения суммарной скорости поступления радона в помещение от всех источников продиктована сложностью или невозможностью прямой оценки поступлений радона, обусловленных диффузионным и конвективным механизмами.

Определение и анализ механизмов поступления радона вытекает в отдельную задачу, по причине необходимости применения различных инженерных мер по уменьшению поступления радона в помещения зданий. Конвективный перенос предотвращается посредством применения трещиностойких узлов и конструкций, герметизации основных путей поступления радона. В ситуации значительного диффузионного поступления перенос радона предотвращается использованием в конструкции материалов с низкими значениями коэффициента диффузии радона [13].

1.3.2. Сток радона

Факторами, приводящими стоку радона, являются вентиляция и радиоактивный распад. Для оценки количественной связи между концентрацией радона $A(t)$ в помещении с КВО и постоянной распада радона воспользуемся решением нестационарного уравнения баланса концентрации радона в помещении:

$$\frac{dA(t)}{dt} = \sum_i S_i + \lambda_v \cdot A_{Rn}^{atm} - A(t) \cdot (\lambda_{Rn} + \lambda_v), \quad (1.1)$$

где S_i – удельное поступление радона из i -го источника в единичный объем помещения, Бк/(м³·ч); λ_v – КВО в помещении, ч⁻¹; $\lambda_{Rn} = 0,00755$ ч⁻¹ – постоянная распада радона; A_{Rn}^{atm} – концентрация радона в наружном воздухе, Бк/м³.

На практике в наиболее вероятном диапазоне значений скорости воздухообмена $\lambda_v \gg \lambda_{Rn}$, поэтому главным определяющим фактором приводящими к снижению концентрации радона в помещении, является вентиляция. На рисунке 1.1 показана зависимость равновесной ($t \rightarrow \infty$) концентрации радона от кратности воздухообмена для различных скоростей поступления радона. Из рисунка видно, что изменение КВО в диапазоне от 0 до 1 ч⁻¹ оказывает значительное влияние на значение равновесной концентрации радона.

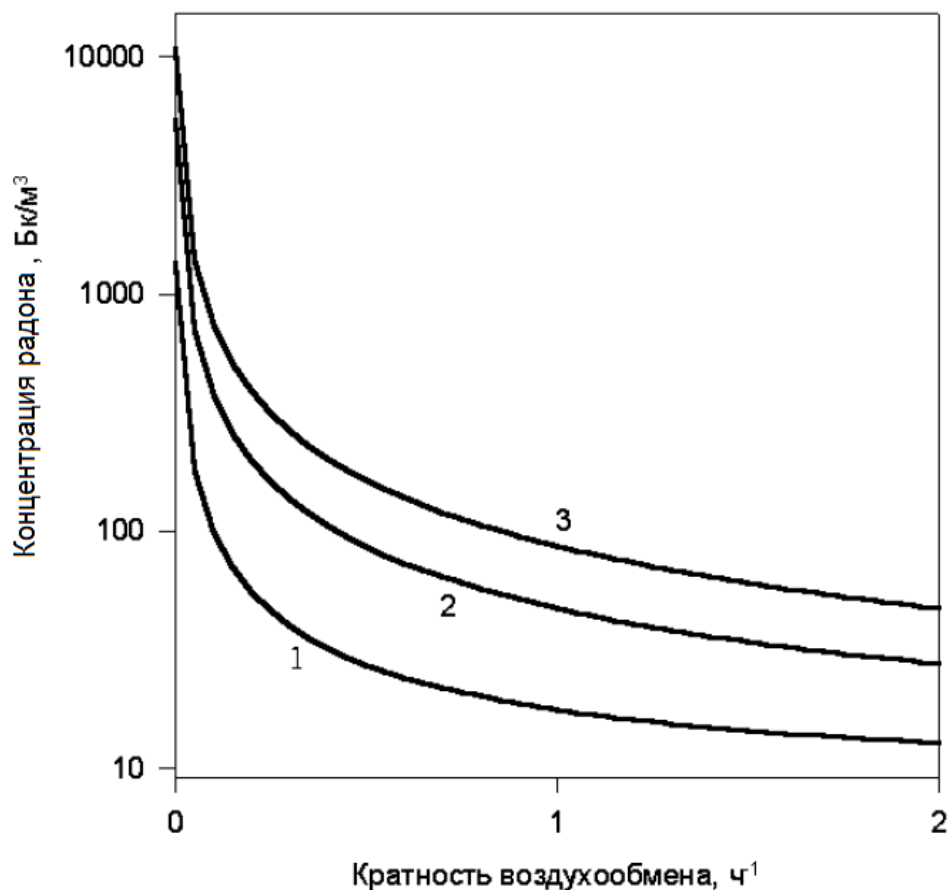


Рисунок 1.1. Зависимость равновесной концентрации радона от КВО для различных скоростей поступления радона: 1 – 10, 2 - 40, 3 – 80 Бк/(м³·ч).

Основными причинами возникновения воздухообмена между внутренним объемом здания и внешней атмосферой при отсутствии источников принудительной вентиляции являются [14,27]: ветровой напор, который создает зоны пониженного давления на подветренной стороне здания, и тепловой напор.

Тепловой напор обусловлен разностью температур между внутренним объемом здания и наружной атмосферой. Поскольку обычно температура воздуха в помещении выше, чем снаружи, возникает эффект дымовой трубы (стек-эффект), приводящий к движению воздуха в вертикальном ограждении, вызванный разностью между плотностью воздуха внутри ограждения и плотностью окружающей атмосферы. Чем ниже температура вне здания, тем выше подъемная сила воздуха внутри. Теплый воздух уходит из здания (эксфильтрация) через оболочку здания – ограждающие конструкции, окна,

щели. При этом наружный воздух натекает в здание (инфильтрация) как за счет неплотностей в оболочке здания, сообщающихся с внешней атмосферой, так и за счет перетекания воздуха по лестничной клетке из квартир нижних этажей [30].

Для оценки КВО помещений традиционно используются индикаторные газы и аэродвери [40].

Использование аэродверей позволяет лишь косвенно определить значение КВО на основании параметров воздухопроницаемости [41,42]. Помимо этого, использование аэродверей накладывает свои ограничения в силу громоздкости конструкции и необходимости специального места для установки.

Способ определения КВО помещений методом индикаторного газа определен стандартом [43], базирующимся на требованиях Федерального закона N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [44]. Согласно которому, здания и сооружения, с одной стороны, должны исключать в процессе эксплуатации нерациональный расход энергетических ресурсов, а с другой – не создавать условия для недопустимого ухудшения параметров среды обитания людей. Использование индикаторных газов позволяет установить соответствие КВО и других показателей воздухопроницаемости помещений нормативным значениям и требованиям контроля этих показателей согласно СНиП 23-02-2003 [45] с учетом требований ГОСТ Р 51380-99 [46] и ГОСТ 51387-99 [47]. Однако методы оценки КВО, основанные на использовании индикаторных газов, таких как N_2O и CO_2 [48-50], SF_6 [51] и радиоактивного газа криптона-85 [52] являются трудоемкими и требующими особого обращения с индикаторными газами ввиду их повышенной опасности для здоровья.

Немаловажным недостатком приведенных методов является сложность их использования для определения КВО в условиях штатного режима эксплуатации помещений. В связи с чем, особый интерес вызывает использование радона в качестве индикаторного газа. Согласно ГОСТ [43] не допускается введение в помещение радиоактивных индикаторных газов, однако радон априори

содержится в воздухе помещений в силу особенностей конструкции и содержания зданий.

В работах [53,54] (для двух закрытых помещений подвального и чердачного типа) на основе непрерывных измерений концентрации радона, разности температур и плотности потока радона с пола одного из помещений было показано, что существует количественная зависимость концентрации радона и КВО помещений от разности температур внутреннего и наружного воздуха. На основании температурной зависимости концентрации радона в помещении был предложен способ [53], в котором КВО может быть определена в закрытом помещении с естественной вентиляцией. Данное условие накладывает ограничения на его использование. Основным из ограничений является то, что приведенный способ не может быть применен к эксплуатируемым помещениям (в условиях активной деятельности человека), где такая оценка представляет значительный интерес.

Выводы

На основании выполненного анализа установлено:

1. Существует тенденция повышения концентраций радона в современных зданиях, вызванная применением в строительстве решений, направленных на увеличение энергосбережения.
2. Отсутствуют надежные и эффективные способы определения скорости поступления радона в помещении. Существующие подходы отличаются сложностью прямой оценки диффузионного поступления радона от всех источников и невозможностью инструментального определения вклада конвективной составляющей в суммарную скорость поступления радона.
3. Определение и анализ механизмов поступления радона вытекает в отдельную задачу, по причине необходимости применения различных

противорадоновых мер в зависимости от преобладания конвективного или диффузионного механизма поступления.

4. Кратность воздухообмена является основным фактором, приводящими к снижению концентрации радона в атмосфере помещений (стоку радона). Однако существующие методы не позволяют определить КВО в реальных условиях эксплуатации помещений.

В результате анализа существующего состояния проблемы облучения населения в помещениях современных зданий были сформулированы основные 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.

Глава 2. КОНЦЕНТРАЦИИ РАДОНА В ПОМЕЩЕНИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ЗДАНИЙ

Уровни концентраций радона в современных зданиях (построенных с применением энергосберегающих технологий) исследовались на примере г. Екатеринбурга, Свердловской области. В выборку, характеризующую современные здания, были включены жилые дома, построенные после 2000 года.

Исследование было проведено на основании совместного анализа данных радонового обследования г. Екатеринбурга, выполненного Институтом промышленной экологии УрО РАН в 2007-2008 гг. [4,55], и результатов дополнительных измерений, проведенных в рамках настоящей работы. Выборка для оценки уровней концентрации радона в помещениях зданий, построенных до 2000 года включительно, была полностью сформирована на основании результатов, полученных в работах [4,55]. Данные для оценки концентраций радона в современных зданиях были дополнены специально организованными измерениями.

2.1. Материалы и методы

2.1.1. Радоновое обследование г. Екатеринбурга

Свердловская область – один из наиболее изученных регионов России в отношении облучения населения природными источниками. Здесь только в рамках специальных радоновых обследований проведены измерения концентрации радона более чем в 2,5 тыс. жилых зданий [4,55-57]. В областном центре г. Екатеринбурге (население ~ 1,4 млн. чел.), измерения концентраций радона проводились в 404 квартирах, расположенных в многоэтажных зданиях города [4,55].

В данных работах проводилось объединение результатов измерений концентраций радона в группы по году постройки зданий на основании опросов

жильцов. Выделялись четыре группы: 1900-1949 гг., 1950-1969 гг., 1970-1989 гг., после 1990 г. На основании таких объединений результатов было показано, что в группе зданий г. Екатеринбурга, построенных после 1990 г., концентрации радона в помещениях оказываются в среднем выше, чем в домах более ранних годов постройки. Как было отмечено выше, в России требования к энергосберегающему строительству были установлены государственными органами с 1996 года [3], поэтому объединение результатов измерений по году постройки зданий в таких широких диапазонах не позволяет провести исследование концентрации радона в современных зданиях.

Объединение результатов исследований в группы было проведено в соответствии с диаграммой распределения количества жилых домов г. Екатеринбурга от года их постройки (Рис. 2.1).

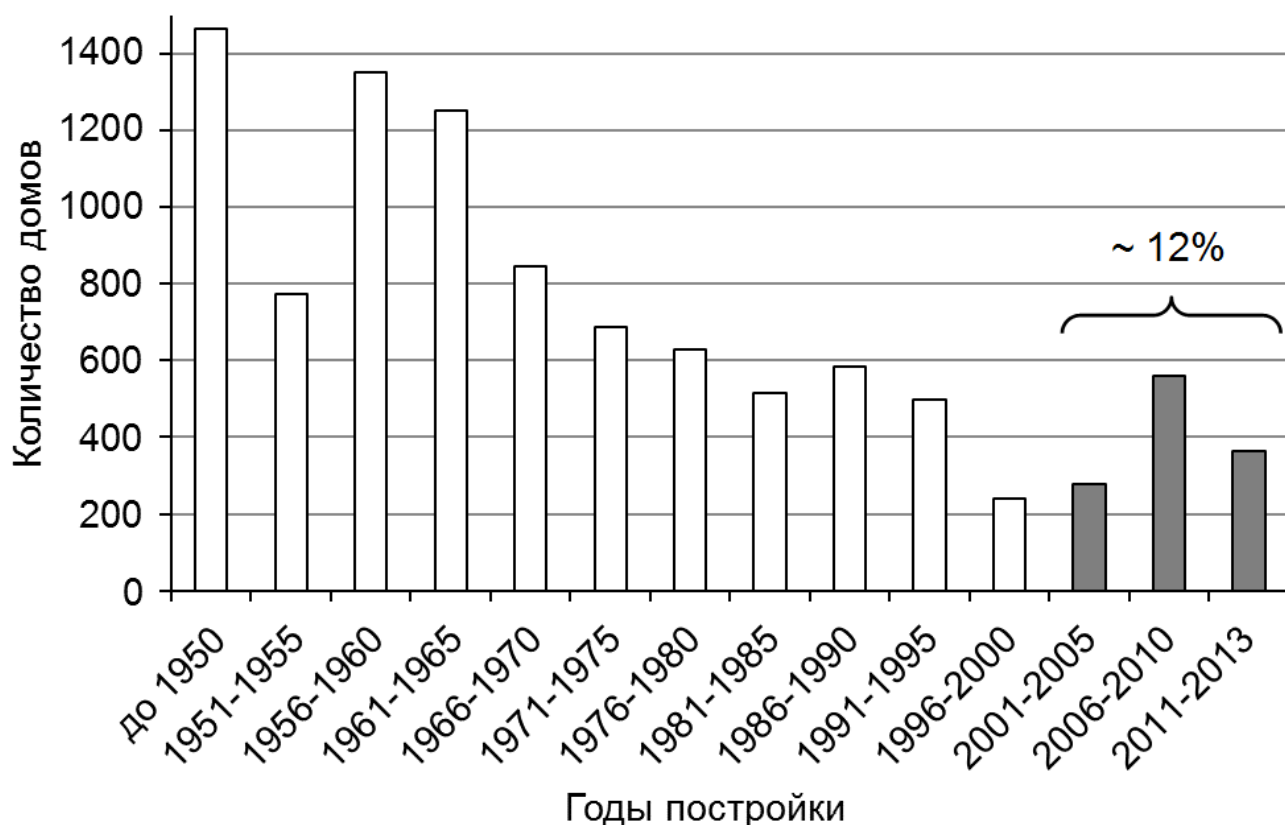


Рисунок 2.1. Распределение количества домов г. Екатеринбурга в зависимости от года их постройки (по данным Уральской Палаты Недвижимости).

В работах [4,55] измерения проводились в 404 квартирах, расположенных в многоэтажных зданиях города Екатеринбурга. При этом, основная часть измерений проводилась в зданиях, построенных до 2000 года включительно (373 дома). Только 10 % обследованных помещений были построены в период с 2001 по 2008 гг.

Для получения полной картины распределения уровней концентрации радона по годам постройки зданий потребовалось проведение дополнительных специально организованных измерений. Основной пробел был заполнен на основании измерений в помещениях зданий, построенных после 2005 года. При выборе помещений предпочтение отдавалось верхним этажам, так как в ряде радоновых обследований в жилых зданиях Свердловской области было показано, что значимые отличия средних значений концентраций радона наблюдаются только между первыми этажами и верхними этажами в целом. Разница между значениями на верхних этажах не является статистически значимой [4,56].

Трековым методом были проведены натурные измерения концентраций радона в 26 зданиях (в том числе в 10 зданиях коттеджного типа), построенных после 2005 года, с использованием типичных для г. Екатеринбурга строительных материалов [58]. Включение в исследование 10 зданий коттеджного типа было обусловлено тем, что в г. Екатеринбурге в строительстве как современных многоэтажных зданий, так и домов коттеджного типа распространено применение золы в качестве наполнителей внешних ограждающих конструкций и стеновых материалов. В домах коттеджного типа стеновые конструкции выполняются целиком из газозолобетона, что позволило предположить для таких материалов высокую удельную активность (УА) радия-226. Несмотря на то, что диффузионное поступление радона из строительных материалов, как правило, не приводит к повышенной концентрации радона в помещениях [16,59,60], в таких материалах как доменные шлаки и зола, получаемых в ходе

промышленной переработки и используемых для производства бетона, УА радия-226 может быть высокой (Приложение 1).

Для проведения измерений были использованы те же, что и в работах [4,55], интегрирующие методы измерения концентрации радона с использованием твердотельных трековых детекторов (ТД) альфа частиц [67-69]. Данные методы рекомендован НКДАР ООН и ВОЗ для проведения национальных и региональных радоновых обследований.

Дополнительно организованные измерения концентрации радона в помещениях современных зданий проводились в межсезонье, чтобы охватить отопительный и неотопительный сезоны. В среднем период измерения составил 2 месяца. Продолжительное экспонирование интегральных трековых радиометров радона (от 1 до 6 месяцев) позволяет избежать ошибки, связанной с краткосрочными вариациями концентраций радона [69]. Значения, полученные по результатам измерений, были приняты равными среднегодовым. Диапазон температур наружного воздуха, при котором были получены результаты (от 0 до 5 °С), согласно [4] соответствует среднегодовому, поэтому проведение температурной нормализации не требуется.

При установке детектора в помещении заполнялась специальная форма для регистрации характеристик здания и помещения, в котором проводились измерения. По окончании экспонирования жители упаковывали радиометр радона и возвращали его в Радиационную лабораторию ИПЭ УрО РАН. После окончания экспонирования проводилась лабораторная обработка ТД. При обработке ТД изымался из диффузионной камеры радиометра радона, в соответствии с методикой проводилось травление в щелочной среде, промывка, сушка и подсчет числа треков. По данным измерения числа треков и продолжительности измерения рассчитывалась концентрация радона.

2.1.2. Радиационные характеристики современных строительных материалов

Для оценки вклада поступления радона из современных строительных материалов (монолитного бетона и газозолобетона) были проведены лабораторные исследования образцов сырья и готовой продукции. Исследуемые пробы являлись типовыми материалами, используемыми строительным предприятием «Атомстройкомплекс» для жилищного строительства. «Атомстройкомплекс» является одним из самых крупных строительных предприятий г. Екатеринбурга. Этим предприятием за последние 10 лет в городе возведено более 50% объектов жилищного строительства.

В соответствии с модифицированным методом измерения удельной активности [70] был проведен анализ радиационных характеристик строительных материалов: зола, цемент, известь (по 6 проб каждого исходного материала); алюминиевая пудра (2 пробы); 5 проб готовых газоблоков; 8 проб из тяжелого (монолитного) бетона.

Пробы отбирались представителями ООО «ПСО «Теплит», являющимся производителем изделий из автоклавного газозолобетона и входящим в группу заводов ТД «Атомстройкомплекс». После доставки в радиационную лабораторию ИПЭ УрО РАН пробы при необходимости измельчались, засыпались в стеклянную тару объемом 1,5-2 л. и закрывались крышкой.

Определение УА отобранных образцов проводилось на спектрометрической установке для измерения активности радионуклидов РКГ-АТ1320 (Атомтех, Белоруссия). Данная установка предназначена для измерения УА γ -излучающих радионуклидов в объектах окружающей среды, материалах и продуктах промышленного производства в условиях стационарных лабораторий в сосуде Маринелли емкостью 1 л. В качестве детектора гамма-излучения используется сцинтилляционный блок детектирования с кристаллом NaI(Tl) 63×63 мм. Радиометр обеспечивает регистрацию гамма-излучения в диапазоне энергий от

50 до 3000 кэВ и запись в память 499 измеряемых спектров. Гамма-радиометр РКГ-АТ1320 в автоматическом режиме определяет УА по энергетическим окнам для следующих радионуклидов: ^{137}Cs – 662 кэВ, ^{40}K – 1461 кэВ, ^{226}Ra – 1764 кэВ и ^{232}Th – 2615 кэВ. Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения активности радионуклидов не превышают $\pm 20\%$.

Для снижения потерь свободного радона из пробы использовался модифицированный метод измерения удельной активности [70], позволяющий снизить эманирование радона. Снижение концентрации радона в межпоровом и свободном пространстве емкости временного хранения производилось путем добавки навески активированного угля в исследуемую пробу. С его помощью удается добиться уменьшения диффузии радона во внешнее пространство и уменьшения потерь свободного радона при пересыпании из емкости временного хранения в измерительную кювету.

Для восстановления сорбционных свойств, уголь был предварительно регенерирован в сушильном шкафу. Сразу после окончания регенерации горячий уголь пересыпался в герметично закрывающуюся термостойкую емкость для остывания. Остывший регенерированный уголь засыпался в количестве 10 г. в каждую пробу и тщательно перемешивался. Затем пробы, герметизировались в сосудах с навинчивающейся крышкой и выдерживались в течение 15 суток.

После выдержки пробы, вместе с присутствующим в них активированным углем, пересыпались в сосуд Маринелли и закрывались крышкой. За время пересыпания пробы радон, находящийся в равновесии с радием-226, не успевает десорбироваться и измерение активности пробы по дочерним продуктам распада радона позволяют сделать адекватную оценку удельной активности радия-226.

Скорость поступления радона из ограждающих конструкций определяется удельной активностью радия-226 в строительном материале и внутренней структурой материала. При этом количество радона, выделяющееся в окружающую среду из твёрдого вещества, к полному его количеству,

образующемуся за тот же промежуток времени, определяется коэффициентом эманирования.

Для нахождения коэффициента эманирования проводились следующие действия [58]:

1. На гамма-радиометре РКГ-АТ1320 в соответствии с модифицированным методом измерения удельной активности определялась удельная активность радия-226 в материале.

2. Измерялась масса пробы.

3. Эта же проба насыпалась на дно герметичного контейнера и выдерживалась в течение трех недель (времени, достаточном для установления равновесия между активностью радия-226 и радона).

4. После выдержки проводилось измерение концентрации радона в контейнере. Коэффициент эманирования вычислялся по формуле [21]:

$$E = \frac{A_v \cdot V_k}{C_m \cdot m}, \quad (2.1)$$

где C_m - удельная активность радия-226 в пробе, Бк/кг; A_v – концентрация радона в контейнере, Бк/м³; V_k – объем контейнера, м³; m – масса пробы, кг.

Было произведено определение удельной активности естественных радионуклидов (радий ²²⁶Ra, торий ²³²Th, калий ⁴⁰K) и эффективной удельной активности естественных радионуклидов (ЕРН). Полученные результаты приведены в Таблице 2.1.

Согласно таблице 2.1 эффективная удельная активность ($A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3 \cdot A_{Th} + 0,09 \cdot A_K$) для всех материалов не превышает предельно допустимого уровня УА в 370 Бк/кг (материалы I класса – материалы, используемые в строящихся и реконструируемых жилых и общественных зданиях). Измеренное значение УА радия-226 в тяжелом бетоне несколько выше среднемирового значения в 40 Бк/кг (Приложение 1). Удельная активность радия-226 в газозоблоках из аэрированного бетона значительно ниже среднемирового уровня. Также согласно описанной методике были определены

коэффициенты эманирования радона для готовых строительных материалов: для монолитного бетона коэффициент эманирования составил 0,17; для газозобетона 0,22, что хорошо согласуется с результатами, полученными в работах [21,66].

Таблица 2.1.

Радиационные характеристики строительных материалов.

№ п/п	Наименование материала	Удельная активность, Бк/кг *			
		Ra-226	Th-238	K-40	Эффективная удельная активность ЕРН, A _{эфф}
1	цемент ЦЕМ I 42,5 Н	65±14	7±5	172±52	89±16
2	известь молотая	23±6	< 5	< 53	23±10
3	зола уноса	34±10	34±8	167±53	93±15
4	отсев дробления Режевского щебеночного карьера	46±12	21±6	600±130	125±18
5	отсев дробления Шарташского щебеночного карьера	66±15	31±7	840±170	178±23
6	газоблоки марки D400	25±10	14±6	113±53	53±13
7	газоблоки марки D500	23±8	20±6	118±40	59±12
8	тяжелый (монолитный) бетон	55±12	29±7	650±130	149±19

* – средние арифметические значения с указанием 95% доверительного интервала.

В целом, оцененная УА радия-226 в материалах, используемых в современном строительстве, находится на уровне 50 Бк/кг, являющимся средним

уровнем УА радия-226 в природном камне и песке, используемом для строительства в регионе. Содержание радия-226 в современных строительных материалах находится на уровне УА радия-226 в материалах, использованных до введения требований к энергосбережению.

2.2. Концентрации радона в помещениях зданий, построенных до 2001 года

Для повторного анализа результатов радонового обследования г. Екатеринбурга [4,55] была сформирована выборка из помещений зданий, построенных до 2000 г. включительно. Информация о годе постройки каждого из зданий выборки была получена на основании данных Уральской Палаты Недвижимости. Полученная выборка включила достаточно представительные подгруппы (по 10–50 квартир) для каждого из одиннадцати временных интервалов (Рис. 2.2). Некоторая непропорциональность количества измерений общему количеству домов во временном интервале не повлияла на результаты анализа.

Структура выборки по типам и основным характеристикам зданий (Рис. 2.2) также в целом соответствует структуре основного жилого фонда города. Основная часть измерений в выборке была проведена в квартирах кирпичных (~40%) и панельных (~52%) многоквартирных домов. В целом сформированная выборка жилищ является представительной по объему и структуре.

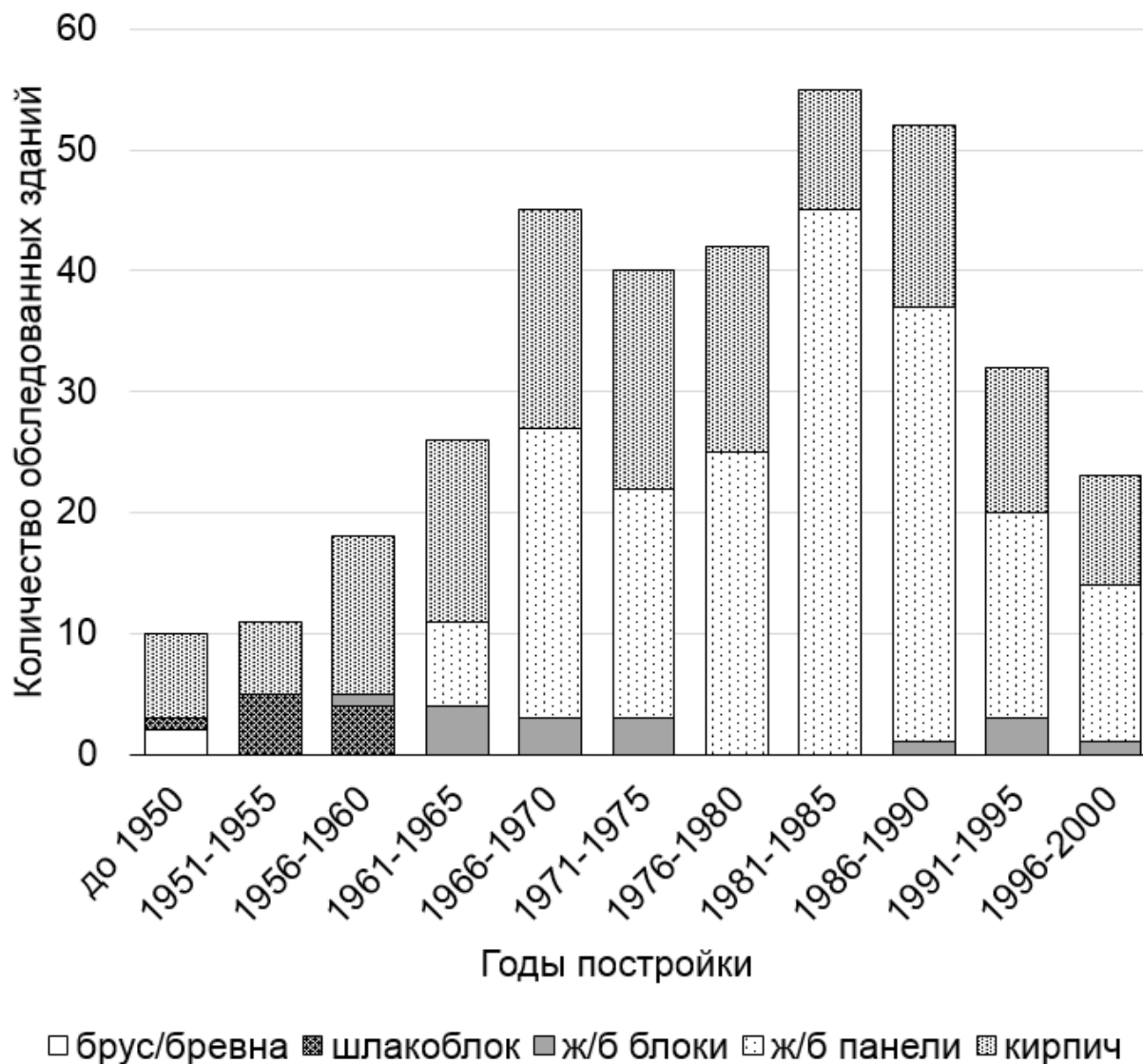


Рисунок 2.2. Распределение количества обследованных зданий г. Екатеринбурга в зависимости от года их постройки (с указанием основного типа ограждающих конструкций).

Распределение концентраций радона в выборке жилищ, включенных в выборку г. Екатеринбурга, представлено на рисунке 2.3, в подрисуночной надписи приведены результаты проверки соответствия распределения теоретическому с использованием статистики χ^2 .

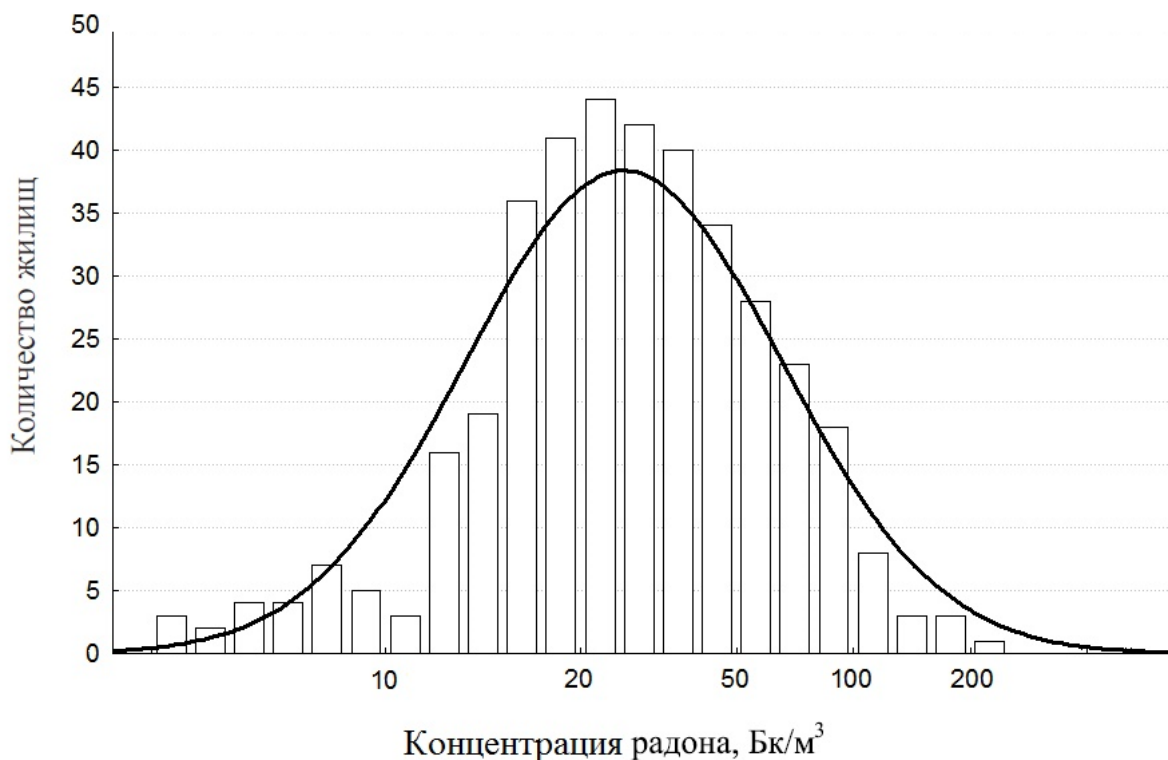


Рисунок 2.3. Логнормальное распределение концентрации радона в зданиях г. Екатеринбурга построенных до 2001 года ($\chi^2=31$; $df = 17$; $p=0,02$).

Как видно из рисунка 2.3 полученное распределение хорошо аппроксимируется логнормальным. Среднее арифметическое значение концентрации радона в выборке составило 38 Бк/м³, при этом среднее геометрическое – 29 Бк/м³, стандартное отклонение логарифма $\sigma_{LN}=0,76$. Полученное значение соответствует среднему общемировому значению в 40 Бк/м³.

Сравнение средних характеристик в подвыборках квартир на первом этаже и на верхних этажах многоквартирных зданий представлено в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Сравнение средних характеристик концентрации радона в подвыборках квартир на первом этаже и на верхних этажах многоквартирных зданий.

Этаж	Среднее арифм., Бк/м ³	Среднее геометр., Бк/м ³	σ_{LN}
первые этажи	53	35	0,91
верхние этажи	36	28	0,73

Соотношение величин σ_{LN} свидетельствует о том, что на первых этажах типовых зданий, условия поступления радона менее однородны. Для этих помещений можно предположить существенный вклад конвективного поступления радона из подвальных помещений.

При анализе результатов в полученной выборке были учтены требования Норм радиационной безопасности [2], согласно которым нормируемой величиной является среднегодовое значение эквивалентной равновесной объемной активности радона в воздухе помещений. Эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) радона связана с концентрацией радона коэффициентом равновесия F:

$$\text{ЭРОА} = A \cdot F, \quad (2.2)$$

где A - концентрация радона в воздухе помещения, Бк/м³.

Для отдельных типов помещений, географических регионов и определенного времени года значения коэффициента равновесия могут различаться. Точное значение величины F расчету не поддается и обычно определяется экспериментально. Согласно [4] значение коэффициента равновесия на Среднем Урале для наиболее вероятного диапазона изменения параметров КВО $\lambda_v = 0,2-1,5 \text{ ч}^{-1}$ варьируется в пределах от 0,44 до 0,53 и имеет характерное значение 0,5 [71].

В ходе исследования было обнаружено всего одно жилое помещение, в котором ЭРОА радона, полученная с учетом использования коэффициента равновесия 0,5, превысила предельно допустимый для помещений эксплуатируемых зданий уровень ЭРОА радона в 200 Бк/м³. В целом с учетом определенных параметров распределения прогнозируемая доля жилищ с ЭРОА радона выше 200 Бк/м³ составила менее 0,2 %.

2.3. Концентрации радона в помещениях современных зданий

Как видно из рисунка 2.1. количество современных зданий (возведенных после 2001 года), составляет порядка 12 % от общего числа. Таким образом, концентрации радона в помещениях современных зданий вносят существенный вклад в формирование среднего городского уровня концентрации радона.

Выборка из результатов измерений концентрации радона в 41 здании (год постройки с 2001 по 2008 гг.) была дополнена результатами дополнительных измерений трековыми детекторами. Измерения проводились в 26 зданиях, построенных в период с 2005 по 2013 гг. Средние значения концентраций радона в группе, состоящей из результатов измерений в 26 помещениях (16 в квартирах многоэтажных домов, 10 в домах коттеджного типа), приведены в Таблице 2.3.

Таблица 2.3.

Средние характеристики концентраций радона в современных зданиях по результатам дополнительных измерений.

Этаж	Среднее арифм., Бк/м ³	Среднее геометр., Бк/м ³	σ_{LN}
в зданиях, построенных преимущественно из монолитного бетона			
верхние этажи	98	81	0,95
в коттеджах, построенных из газозолобетона			
1 - 2 этаж	91	82	0,57

Согласно полученным результатам, использование золы в качестве наполнителя ограждающих конструкций не вносит значительного вклада в уровень концентрации радона по сравнению с многоэтажными зданиями современной постройки. Поэтому, чтобы обеспечить однородность выборки, результаты измерений в двухэтажных домах коттеджного типа были исключены из анализа.

На основании совместного анализа результатов (57 квартир в многоэтажных домах) было получено распределение концентраций радона в выборке современных зданий г. Екатеринбурга (Рис. 2.4). Среднее арифметическое значение концентрации радона в выборке составило 83 Бк/м^3 , при этом среднее геометрическое – 62 Бк/м^3 , стандартное отклонение логарифма $\sigma_{LN}=0,84$.

С учетом определенных параметров распределения прогнозируемая доля современных зданий с ЭРОА радона выше 200 Бк/м^3 составила более 6,5 %. Прогнозируемая доля современных зданий с ЭРОА выше нормируемого уровня для новых зданий жилищного и общественного назначения (100 Бк/м^3), составила порядка 14 %.

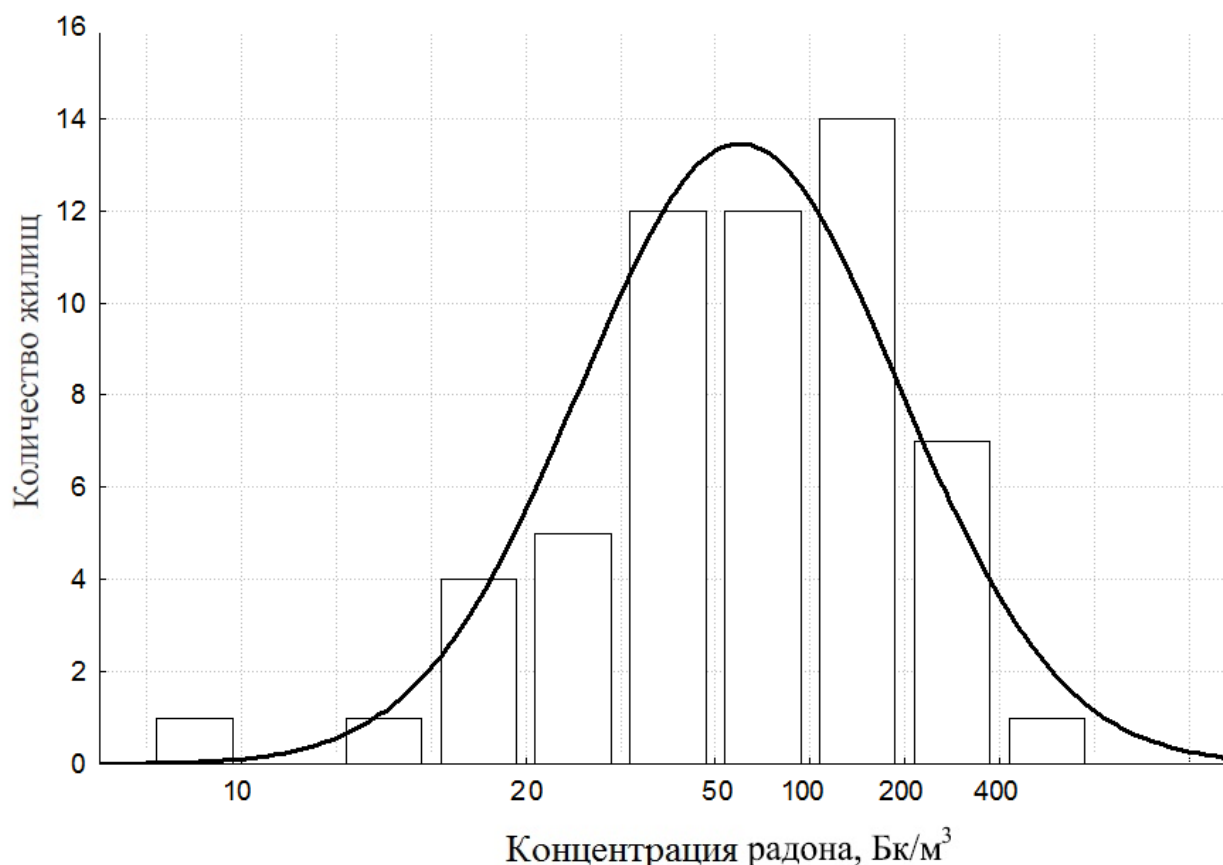


Рисунок 2.4. Логнормальное распределение концентрации радона в современных зданиях г. Екатеринбурга ($\chi^2=2,7$; $df = 3$; $p=0,44$).

Сравнение средних значений концентрации радона в помещениях для группы современных зданий и для зданий с периодом застройки до 2000 года

включительно показывает, что за последние годы уровни концентрации радона выросли более чем в 2 раза. На основании полученных результатов была построена диаграмма, демонстрирующая распределение значений концентрации радона в жилищах г. Екатеринбурга от года постройки здания (Рис. 2.5). Согласно полученным результатам, наблюдается значительный рост концентрации радона в помещениях зданий, построенных после 2000 г. Такая тенденция может привести к росту уровней облучения населения и увеличению заболеваемости и смертности от рака легкого в будущем.

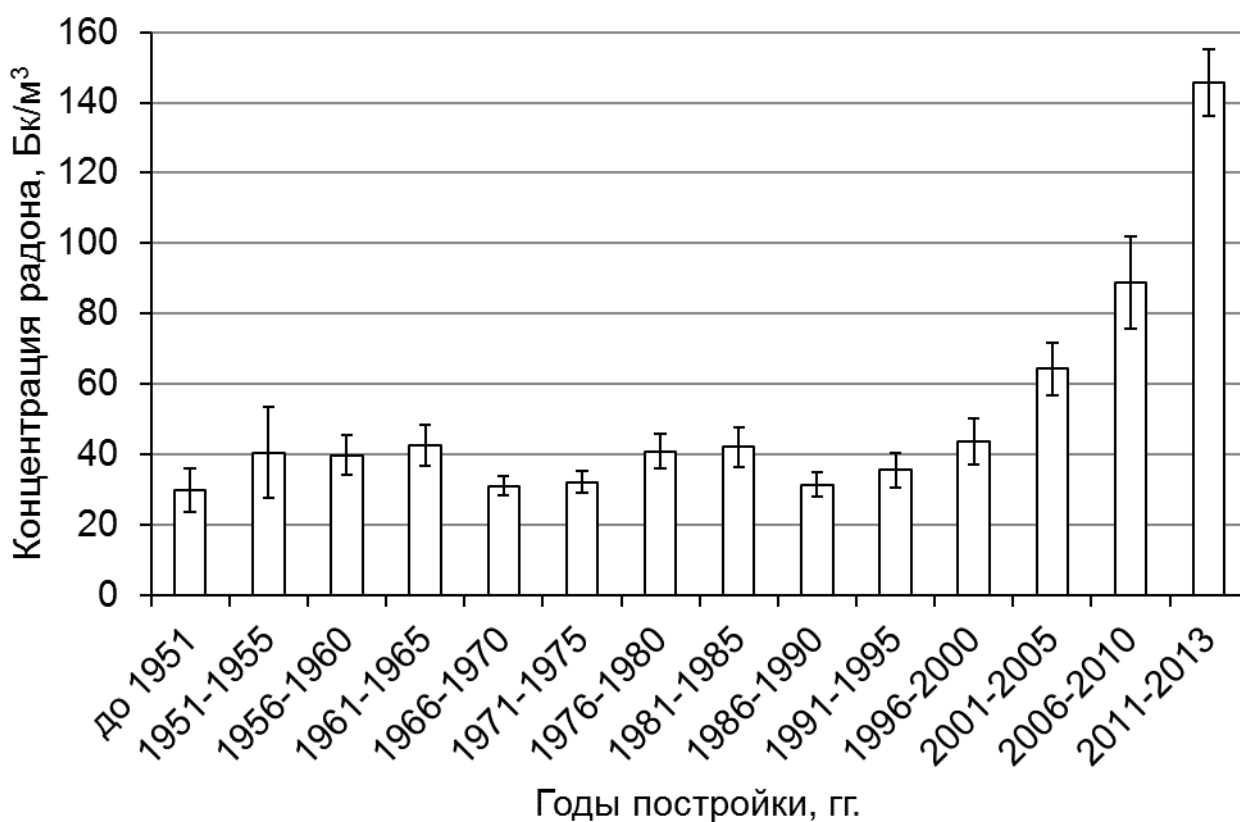


Рисунок 2.5. Зависимость концентрации радона в помещениях домов г. Екатеринбурга в зависимости от года постройки дома (указаны средние значения и стандартные ошибки).

Результаты исследования показывают, что использование различных технологий строительства, определенных в контексте исследования типом ограждающих конструкций (ж/б панелей, кирпича, монолитного бетона и пр.),

может приводить к значительным различиям в уровнях концентрации радона. В работе [55] было показано, что самые низкие концентрации радона в помещениях были достигнуты в период с 1970 по 1989 годы, в панельных домах. При этом согласно данным Уральской Палаты Недвижимости процент современных панельных домов, возведенных за период с 2001 по 2013 годы, не превышает 30 %. Таким образом, увеличение количества зданий современной постройки, способствует повышению среднего городского уровня концентрации радона, что противоречит концепции планомерного снижения облучения населения радоном.

Задача снижения неприемлемых уровней риска требует в первую очередь уменьшения концентраций 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.

Выводы

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.
2. Увеличение уровней концентрации радона в современных зданиях связано с новыми технологиями строительства, определенными в контексте исследования типом ограждающих конструкций.

Глава 3. СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ РАДОНА И ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХООБМЕНА

Для решения задачи выявления доминирующего потока радона (диффузионного или конвективного) был разработан способ оценки характерных параметров, определяющих концентрации радона в помещении. Получен патент на изобретение «Способ определения доминирующего механизма поступления радона в помещении» (№ 2508526).

3.1. Суть и теоретическая основа подхода

Суть разработанного подхода к определению механизмов и параметров поступления радона заключается в непрерывном измерении концентрации радона и разности температур снаружи и внутри помещения с шагом в один час [72,73]. 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).

В стационарном состоянии естественный воздухообмен в помещении по определению меньше, чем в активном режиме и при этом происходит накопление радона в помещении (рост концентрации). Предлагается использовать при обработке измерений не достигнутое максимальное значение концентрации радона в помещении, а всю кривую накопления. Такой принцип обработки измерений близок к методу измерений в накопительной камере, описанному в работе [31].

Определение параметров поступления и накопления радона в разработанном подходе проводится на основании анализа временного ряда изменения концентрации радона. Типичный вид временного ряда концентрации

радона (A , Бк/м³) представлен на рисунке 3.1. Близкий характер изменения концентрации радона во времени показан во многих работах [74,75].

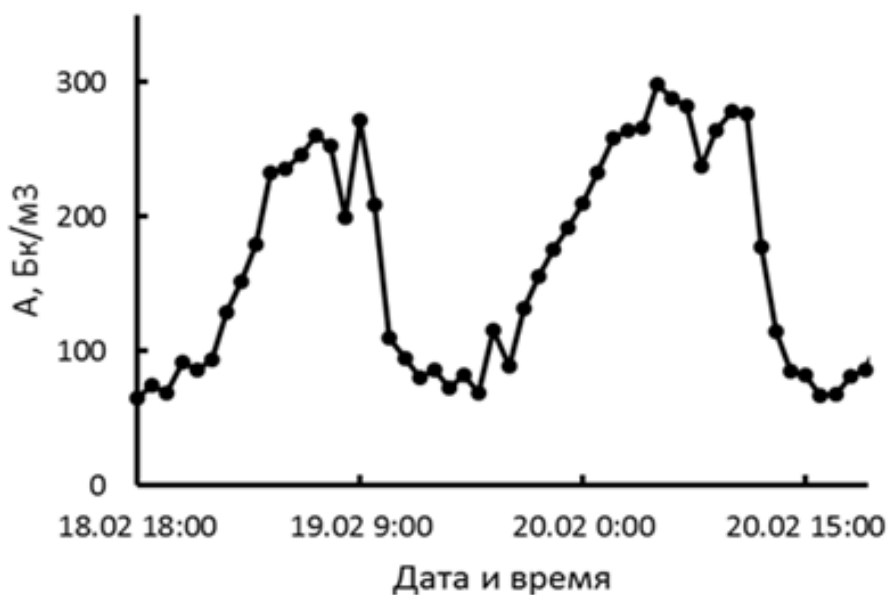


Рисунок 3.1. Типичный вид временного ряда концентрации радона.

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 [75-83]. Это обусловлено в первую очередь тем, что сложность определения реального поступления радона в конкретные здания не позволяет проводить экспериментальные измерения всех необходимых параметров [84,85]. Временная зависимость концентрации радона $A(t)$ в помещении может быть представлена в виде известного дифференциального уравнения первого порядка (предполагается, что радон перемешивается мгновенно по всему объему помещения):

$$\frac{dA(t)}{dt} = S(t) - (A(t) - A_{Rn}^{atm}) \cdot \lambda_v(t) - (A(t) - A_{Rn}^{atm}) \cdot \lambda_{Rn}, \quad (3.1)$$

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.

Поскольку даже полностью закрытое помещение будет иметь КВО в стационарном режиме эксплуатации на уровне, по крайней мере, 0,05 ч⁻¹, что много больше постоянной распада, третьим членом уравнения (3.1) можно пренебречь. В свою очередь, для г. Екатеринбурга средняя концентрация радона в наружном воздухе A_{Rn}^{atm} (полученная на основании продолжительного полносезонного измерения при помощи радон-монитора AlphaGUARD) составляет 12 Бк/м³. Таким образом, вклад A_{Rn}^{atm} в уровни концентрации радона в дальнейшем также не учитывался.

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

$$S_0 = S_D + S_C, \quad (3.2)$$

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 работе Э.М. Крисюка [86]. Для описания скорости диффузионного поступления радона, S_D , вводят в рассмотрение плотность потока радона (скорость эксхалации радона) q , так что:

$$S_D = \frac{\sum_j q_j \cdot \Pi_j}{V}, \quad (3.3)$$

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 можно непосредственно связать с удельной активностью радия-226 в строительном материале [16,86]:

$$q = C_{Ra} \rho E \sqrt{\frac{\lambda_{Rn} D_e}{\varepsilon}} \operatorname{th} \left(d \sqrt{\frac{\lambda_{Rn} \varepsilon}{D_e}} \right), \quad (3.4)$$

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 [76]. В этом случае, скорость конвективного поступления радона, S_C , описывается формулой [87]:

$$S_C = A_C \frac{\Delta P}{R_C} V^{-1}, \quad (3.5)$$

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. [16,78,87]. Так в рамках модели, используемой в Финском Центре радиационной и ядерной безопасности [87], 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 [87]:

$$\Delta P = \rho_0 \cdot g \cdot H_{npl} \cdot \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}}, \quad (3.6)$$

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

В [78,88] 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) [42]. По аналогии с эффективной площадью натекания, для описания конвективного переноса радона в здание используется такое понятие, как площадь натекания радона $\Pi_{нат}^{Rn}$. Согласно [78] 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:

$$S_C = A_C \cdot \Pi_{нат}^{Rn} \cdot v_0 \cdot \left(\frac{\Delta \rho g H}{P_0} \right)^{n_r} V^{-1}, \quad (3.7)$$

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

Приведенные подходы к моделированию конвективного поступления дают возможность делать принципиальные выводы о зависимости концентрации радона в помещении от разности температур между внутренним объемом помещения и наружной атмосферой

$$\Delta T = T_{in} - T_{out}. \quad (3.8)$$

В частности, в работе [87], модель, разработанная в Финском Центре радиационной и ядерной безопасности, была использована для изучения сезонных вариаций концентрации радона.

Теоретические представления и экспериментальные данные о связи скорости поступления радона с разностью температур ΔT позволяют предложить способ определения вклада диффузионного и конвективного потока (механизма поступления) радона в помещение на основании изучения зависимости концентрации радона от разности температур между внутренним объемом помещения и внешней атмосферой.

Скорость поступления радона S_0 для $\Delta T \neq 0$ обусловлена суммарным диффузионным и конвективным поступлением радона в помещение. 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 ΔT к скорости поступления радона при средней заданной разности температур $\Delta T_{\text{ср}}$:

$$M, \% = \rho_0 \frac{S_0(0)}{S_0(\Delta T_{\text{ср}})} \cdot 100\% \quad (3.9)$$

3.2. Реализация математического решения

С учетом принятых допущений общее решение уравнения (3.1) может быть представлено в виде:

$$A(t) \cdot e^{\int \lambda_v(t) dt'} = \int S(t) e^{\int \lambda_v(t) dt'} dt + A_0, \quad (3.10)$$

где A_0 – константа интегрирования, соответствующая концентрации радона в начальный момент времени, Бк/м³.

Решение уравнения для временной зависимости концентрации радона $A(t)$ описывается следующим выражением:

$$A(t) = e^{-\int \lambda_v(t) dt'} \int S(t) e^{\int \lambda_v(t) dt'} dt + A_0 \cdot e^{-\int \lambda_v(t) dt'}. \quad (3.11)$$

В работе [75] показано, что в пределах суточных измерений значение скорости поступления радона не претерпевает существенных изменений во времени. Таким образом, для характерного необходимого для получения кривой накопления радона суточного периода, изменение суммарной скорости поступления радона будет определяться исключительно разностью температуры ΔT . Если теперь предположить, что КВО постоянная величина, что соответствует стационарному режиму эксплуатации помещения, то уравнение может быть записано в виде:

$$A(t) = \frac{S_0}{\lambda_0} + (A_0 - \frac{S_0}{\lambda_0}) \cdot e^{-\lambda_0 \cdot t}, \quad (3.12)$$

где λ_0 – КВО при стационарном режиме эксплуатации помещения, ч⁻¹; S_0 – суммарная скорость поступления радона в единичный объем помещения, Бк/(м³·ч);

Накопление активности представляет собой процесс, обусловленный скоростью поступления радона в помещение и КВО в стационарном состоянии, с выходом на насыщение $A_{\max} = \frac{S_0}{\lambda_0}$. В этом случае, уравнение (3.12) принимает вид [73]:

$$A(t) = A_{\max} \cdot (1 - e^{-\lambda_0 \cdot t}) + A_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot t}, \quad (3.13)$$

где A_{\max} – максимальная концентрация радона, которая может быть достигнута в помещении при заданных условиях, Бк/м³.

Уравнение (3.12), в котором $\lambda_v = \lambda_0$, описывает процесс накопления радона в квазистационарном состоянии помещения. В реальности активная деятельность человека в помещении приводит к изменениям КВО. При этом 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 с изменяющейся КВО для получения параметров реальных соотношений между режимами воздухообмена. Для этого необходимо описать функцию $\lambda_v(t)$.

При переходе помещения в активный режим эксплуатации (например, при открывании окон) функция $\lambda_v(t)$ будет демонстрировать ступенчатый рост. При закрывании окон, КВО будет возвращаться к своему стационарному значению λ_0 . Процесс изменения функции $\lambda_v(t)$ при открывании окон или включении принудительной вентиляции (как процессы, наиболее значимо влияющие на значение КВО) удобно описать при помощи функции Хэвисайда $\theta(t)$, следующим выражением:

$$\lambda_v(t) = \lambda_0 + \lambda \cdot \theta(N - t), \quad (3.14)$$

где N характеризует продолжительность проветривания, ч; λ – дополнительная КВО, обусловленная деятельностью человека, ч⁻¹ (при этом, $\lambda_{\text{акт}} = \lambda + \lambda_0$ соответствует КВО при активном режиме эксплуатации помещения).

Функция Хэвисайда может быть записана в виде непрерывной функции:

$$\theta(N - t) \approx \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{th}(k \cdot (N - t)), \quad (3.15)$$

где k – коэффициент подъема, большему k соответствует более крутой подъем функции в точке $t=N$.

Таким образом, для процесса изменения функции $\lambda_v(t)$ при открывании окна было принято выражение (3.16):

$$\lambda_v(t) = \lambda_0 + \frac{\lambda}{2} \cdot (1 + \text{th}(k \cdot N - k \cdot t)). \quad (3.16)$$

Удобно положить коэффициент $k = 50$, при этом время перехода между состояниями составляет ~5 минут, что много меньше шага измерений равного 60 минутам (Рисунок 3.2).

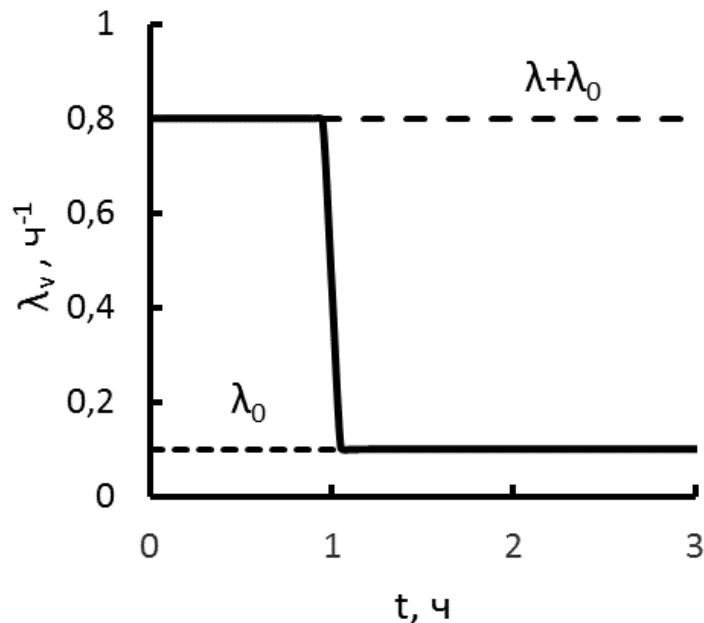


Рисунок 3.2. Пример вида зависимости значения КВО от времени при переходе из активного в стационарный режим эксплуатации помещения ($k=50$).

Подставив выражение (3.16) для КВО в общее решение уравнения для временной зависимости концентрации радона $A(t)$ (2.11), и положив скорость поступления радона в помещение равной величине S_0 , получим следующее выражение:

$$A(t) = \frac{1}{6} e^{-\lambda_0 t} (W - e^{-2k t} (W - 1))^{\lambda/2k} \cdot (S_0 \lambda_0^2 t^3 + 3S_0 \lambda_0 t^2 + S_0 \lambda t^2 (W - 1) \cdot (2k W t - 2\lambda_0 t + \lambda t (W - 1) - 3) + 6S_0 t + 6A_0 e^{-\lambda \cdot N} \cdot W^{-\lambda/2k}) \quad , \quad (3.17)$$

где $W = (e^{2N} + 1)^{-1}$.

Если теперь положить, что $\lambda = 0$ (при значении КВО $\lambda_v = \lambda_0$, соответствующей КВО в стационарном режиме эксплуатации помещения), получим для выражения (3.17):

$$A(t) = \frac{S_0}{\lambda_0} \cdot e^{-\lambda_0 t} \cdot \left(\lambda_0 t + \frac{1}{2} \lambda_0^2 t^2 + \frac{1}{6} \lambda_0^3 t^3 \right) + A_0 \cdot e^{-\lambda_0 t} \quad , \quad (3.18)$$

Так как выражение $1 + \lambda_0 t + \frac{1}{2!} \lambda_0^2 t^2 + \frac{1}{3!} \lambda_0^3 t^3 \dots$ представляет собой разложение функции $e^{\lambda_0 t}$ в ряд Тейлора, то выражение (3.18) при $\lambda = 0$ соответствует полученному ранее уравнению временной зависимости концентрации радона для постоянной стационарной КВО (3.13).

Уравнение (3.17) можно считать базовым для моделирования поступления и накопления радона в атмосфере помещений. Более простое выражение (3.13) для постоянной КВО также позволяет получить интересные величины (значения скорости поступления радона S_0 и КВО λ_0). В свою очередь уравнение (3.17) позволяет получить значения КВО в активном режиме эксплуатации $\lambda_{\text{акт}}$.

Уравнения (3.13) и (3.17) были использованы для описания участков временного ряда концентрации радона, характеризующих переходы помещения из стационарного в активный режим эксплуатации. Для выделения данных участков из общего массива экспериментальных данных был разработан программный алгоритм, блок-схема основной подпрограммы которого приведена в Приложении 2. После выделения искомым участков каждая из

кривых изменения концентрации радона задавалась нелинейной регрессионной моделью при помощи уравнений (3.13) (Рисунок 3.3) или (3.17) (Рисунок 3.4).

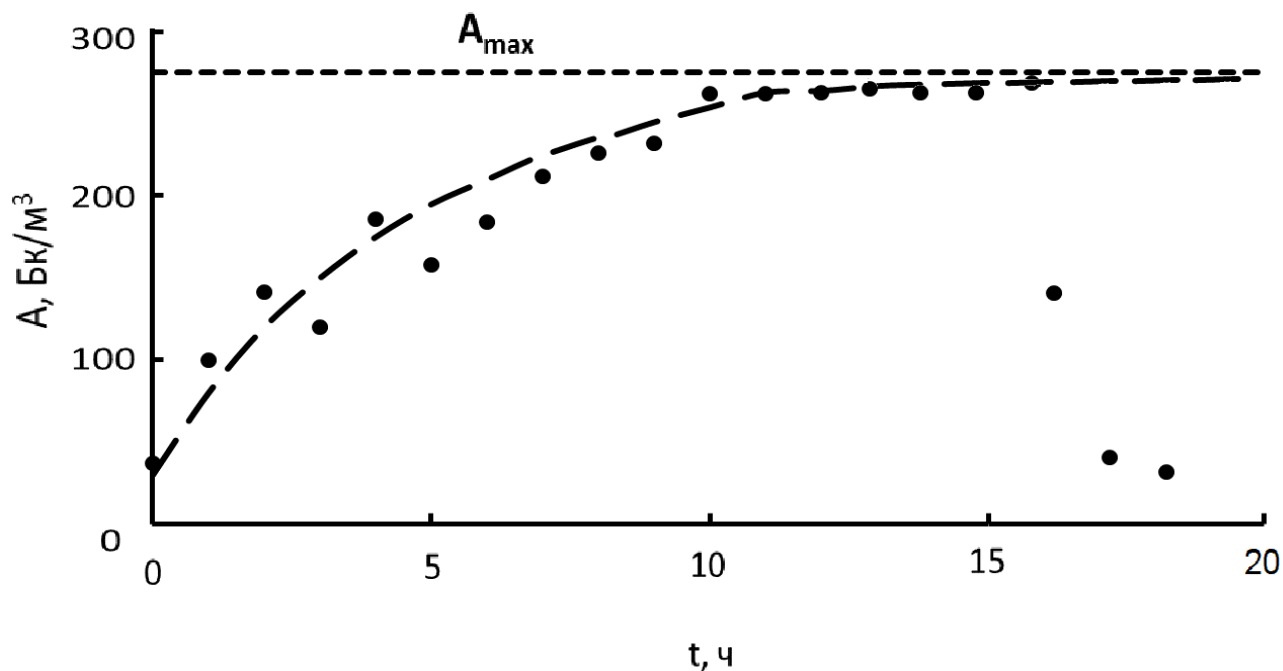


Рисунок 3.3. Участок временной зависимости концентрации радона, характеризующий переход из стационарного в активный режим эксплуатации (кривая соответствует уравнению (3.13), $S_0 = A_{\text{max}} \cdot \lambda_0$).

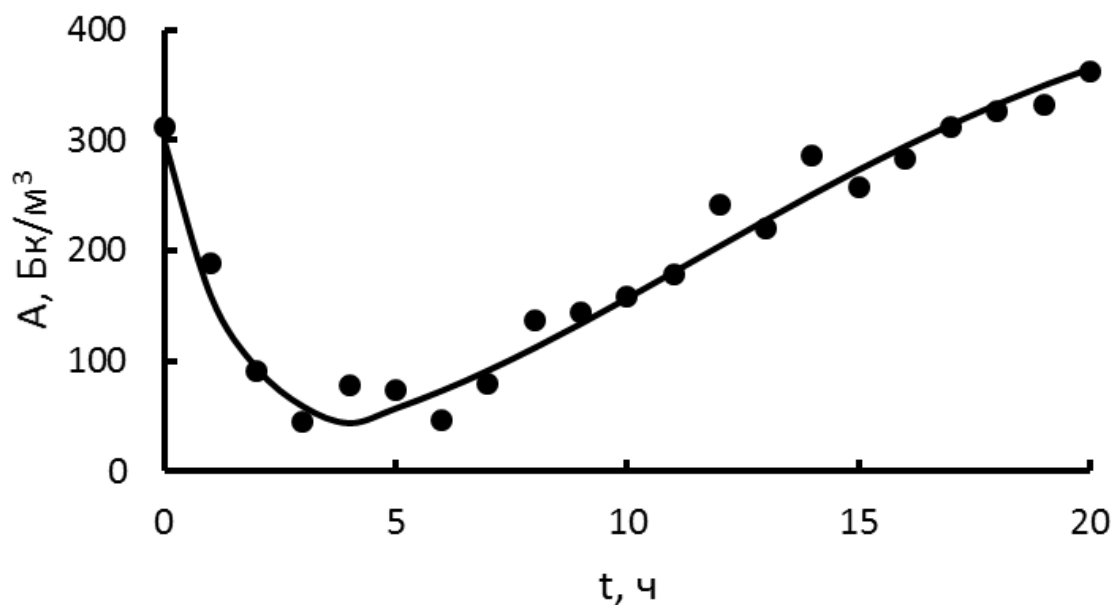


Рисунок 3.3. Участок временной зависимости концентрации радона, характеризующий переход из активного в стационарный режим эксплуатации (кривая соответствует уравнению (3.17)).

На основании оценки параметров регрессионной модели могут быть получены основные интересующие значения: суммарная скорость поступления радона S_0 , λ_0 (КВО в стационарном режиме эксплуатации), $\lambda_{\text{акт}} = \lambda + \lambda_0$ (КВО в активном режиме). При этом среднее значение $\lambda_{\text{ср}}$ может быть получено усреднением значений КВО λ_0 и $\lambda_{\text{акт}}$ с весами, соответствующими времени нахождения помещения в стационарном и активном режимах эксплуатации.

Выводы

1. Разработан способ, позволяющий определять вклад диффузионного и конвективного потоков радона в помещение путем анализа зависимости скорости поступления радона от разности температур между воздухом в помещении и наружной атмосферой.
2. Разработан способ оценки значений характерных параметров поступления и стока радона на основании анализа динамики концентрации радона в помещении.

Глава 4. МЕХАНИЗМЫ И ПАРАМЕТРЫ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДОНА В ПОМЕЩЕНИЯХ

4.1. Аппаратура измерений и характеристика экспериментальных объектов

Для работ по определению параметров поступления радона в помещение был использован радон-монитор AlphaGUARD PQ2000 производства фирмы Genitron Instruments GmbH (Германия) (Рисунок 4.1), позволяющий проводить непрерывные измерения концентрации радона, атмосферного давления и температуры в помещении. При помощи AlphaGUARD MultisensorUnit производилось измерение разности температур и давлений между внутренним объемом здания и наружной атмосферой.



Рисунок 4.1. Радон-монитор AlphaGUARD.

Продолжительные измерения концентраций радона были проведены в 14 помещениях различного назначения: десяти жилых зданиях (многоэтажных зданиях, по одной квартире в каждом) и четырех помещениях зданий офисного типа (Таблица 4.1).

Таблица 4.1. Характеристики помещений и период измерений.

№	Основной материал ограждающих и несущих конструкций, год постройки здания	Этаж измерения / этажность	Характер эксплуатации ²	Период измерения и количество зарегистрир. данных	Среднее значение концентрации радона, Бк/м ³
помещения офисного типа					
1	кирпич, 1970-е гг.	1/2	слабое проветривание, обычный рабочий график	21.10.2004-23.06.2005 результатов - 5105 ¹	133
2	кирпич, 1950-е гг.	2/3	умеренное проветривание, обычный рабочий график	11.08.2010-29.12.2010 результатов - 3355	57
3	кирпич, 1950-е гг.	1/3	умеренное проветривание, обычный рабочий график	25.07.2012-23.12.2012 результатов - 3620	76
4	газобетонные блоки, после 2005	2/2	умеренное проветривание, обычный рабочий график	15.08.2012-14.01.2013 результатов - 3646	107
жилые помещения в многоквартирных домах					
5	кирпич, после 2000	1/5	умеренное проветривание, отсутствие жильцов в дневное время	08.01.2011-01.06.2011 результатов - 3438	62
6	монолит, 2007	17/25	слабое проветривание, постоянное пребывание	27.06.2010 - 28.01.2011 результатов - 2237	193
7	монолит, газобетонные блоки, 2010	6/10	умеренное проветривание, отсутствие жильцов в дневное время	24.01.2012 - 14.08.2012 результатов - 4838	143

¹ - данные были предоставлены М.В.Жуковским.

Таблица 4.1. Характеристики помещений и период измерений
(Продолжение).

№	Основной материал ограждающих и несущих конструкций, год постройки здания	Этаж измерения / этажность	Характер эксплуатации ²	Период измерения и количество зарегистрир. данных	Среднее значение концентрации радона, Бк/м ³
8	монолит, 2012	13/16	умеренное проветривание, отсутствие жильцов в дневное время	21.01.2013 - 24.07.2013 результатов - 4404	203
9	монолит, газобетонные блоки, 2012	3/16	умеренное проветривание, отсутствие жильцов в дневное время	11.01.2013 - 01.08.2013 результатов - 4842	173
10	монолит, 2007	3/24	эпизодическое проветривание	01.07.2011 - 22.12.2011 результатов - 4164	120
11	монолит, 2003	7/10	постоянное проветривание, отсутствие жильцов в дневное время	22.06.2011 - 26.12.2011 результатов - 4477	48
12	монолит, 2002	4/16	умеренное проветривание, постоянное пребывание	28.02.2009 - 28.04.2009 результатов - 1426	50
13	кирпич, 1989	6/14	умеренное проветривание, постоянное пребывание	01.12.2011- 31.05.2012 результатов - 3347	17
14	панельный, 1978	7/9	умеренное проветривание, постоянное пребывание	07.03.2012- 31.05.2012 результатов - 2030	24

² - качественная оценка, полученная на основании опросов.

В среднем период измерений составил 5-6 месяцев, включая летний и зимний сезоны. Никаких ограничений на эксплуатацию помещений не налагалось.

4.2. Определение вклада диффузионного и конвективного потоков радона, и оценка параметров поступления

Исследование механизмов и оценка параметров поступления радона была проведена в 12 помещениях (1-12, Таблица 4.1) [72,89]. В двух помещениях (13-14, Таблица 4.1) 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.

Вид экспериментальной кривой изменения концентрации радона представлен на рисунке 4.2.

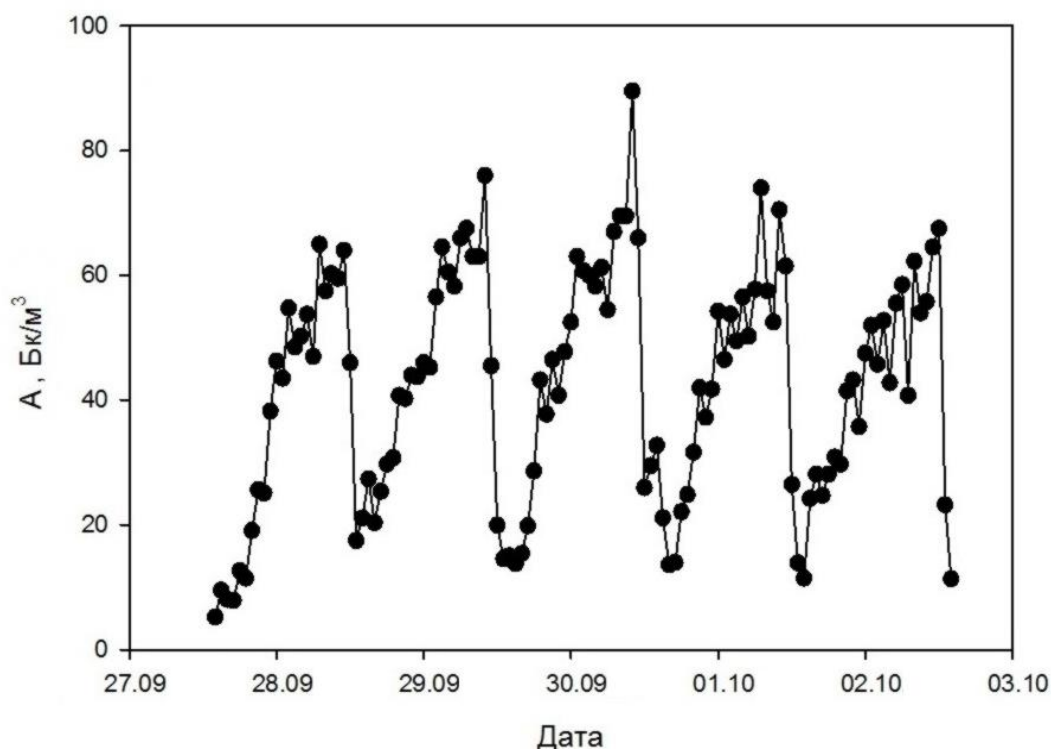


Рисунок 4.2. Пример временного ряда изменения концентрации радона в одном из исследованных помещений (помещение 1).

Для выделения из общего массива экспериментальных данных участков, характеризующих переходы помещения из стационарного в активный режим эксплуатации, был использован программный алгоритм (Приложение 2). После выделения временного ряда, соответствующая кривая изменения концентрации радона описывалась уравнением (3.13) при помощи нелинейного регрессионного анализа. Самым удобным способом определения параметров регрессии является нелинейное оценивание методом наименьших квадратов. Таким образом, для уравнения (3.13) были получены численные значения и стандартные ошибки величин A_0 , A_{\max} и λ_0 .

Для каждого из помещений было проанализировано несколько десятков суточных кривых изменения концентрации радона (от 20 до 60), соответствующих различным разностям температур между внутренним объемом помещения и наружной атмосферой ΔT . В ряде помещений, где прямые измерения температуры наружного воздуха не производились, использовались значения из базы данных о фактической погоде по данным ближайших наземных метеорологических станций [90]. Согласно проведенным оценкам расхождения в температурах между прямыми измерениями и значениями, полученным из источника [90], составляют не более 2-3 °С. На основании проведенных полносезонных измерений в 14 помещениях также было получено значение $\Delta T_{\text{ср}} \approx 20$ °С (соответствующее температуре наружной атмосферы в 5°С). Среднее значение разности температур $\Delta T_{\text{ср}}$ было использовано для оценки вклада диффузионного поступления в обследованных помещениях согласно уравнению (3.9).

Все параметры поступления и накопления радона в обследованных помещениях, полученные на основании разработанного подхода, приведены в Таблице 4.2.

Таблица 4.2.

Параметры поступления и накопления радона в обследованных помещениях.

№	$S_0 \pm \text{станд.ош.},$ Бк/м ³ ·ч ⁻¹	$\lambda_0 \pm \text{станд.ош.},$ 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. На рисунках 4.3-4.14, по результатам полносезонных измерений, для всех обследованных помещений представлены зависимости скорости поступления радона от ΔT с указанием стандартных отклонений значений.

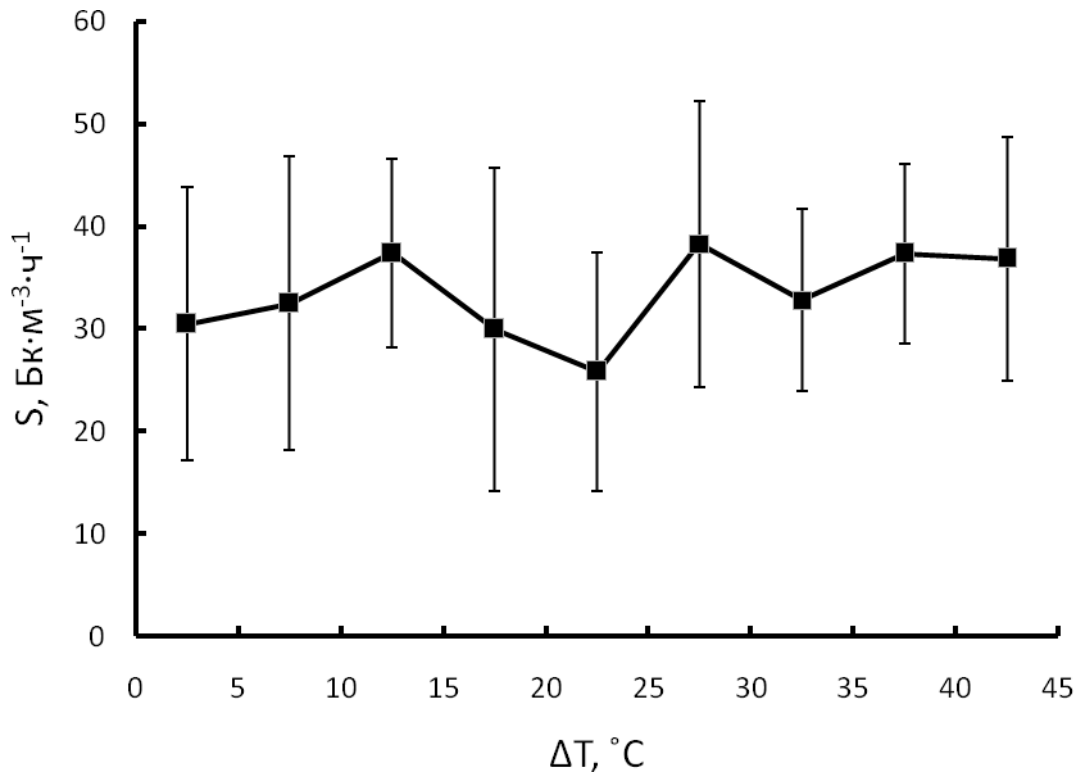


Рисунок 4.3. Зависимость скорости поступления радона в помещение от разности температур ΔT (Помещение 1).

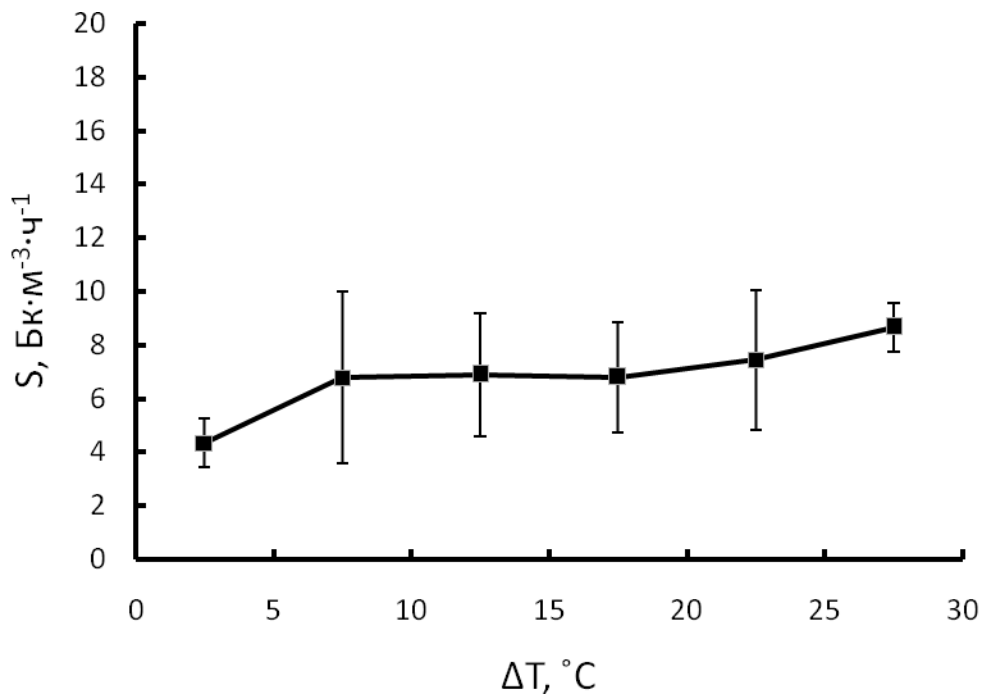


Рисунок 4.4. Зависимость скорости поступления радона в помещение от разности температур ΔT (Помещение 2).

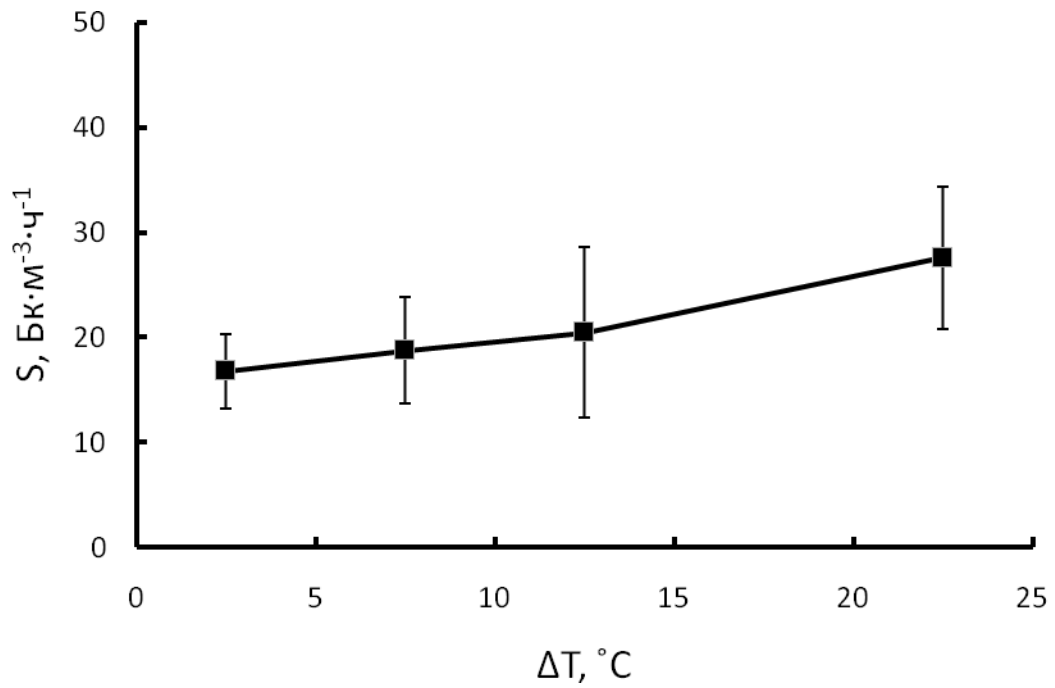


Рисунок 4.5. Зависимость скорости поступления радона в помещение от разности температур ΔT (Помещение 3).

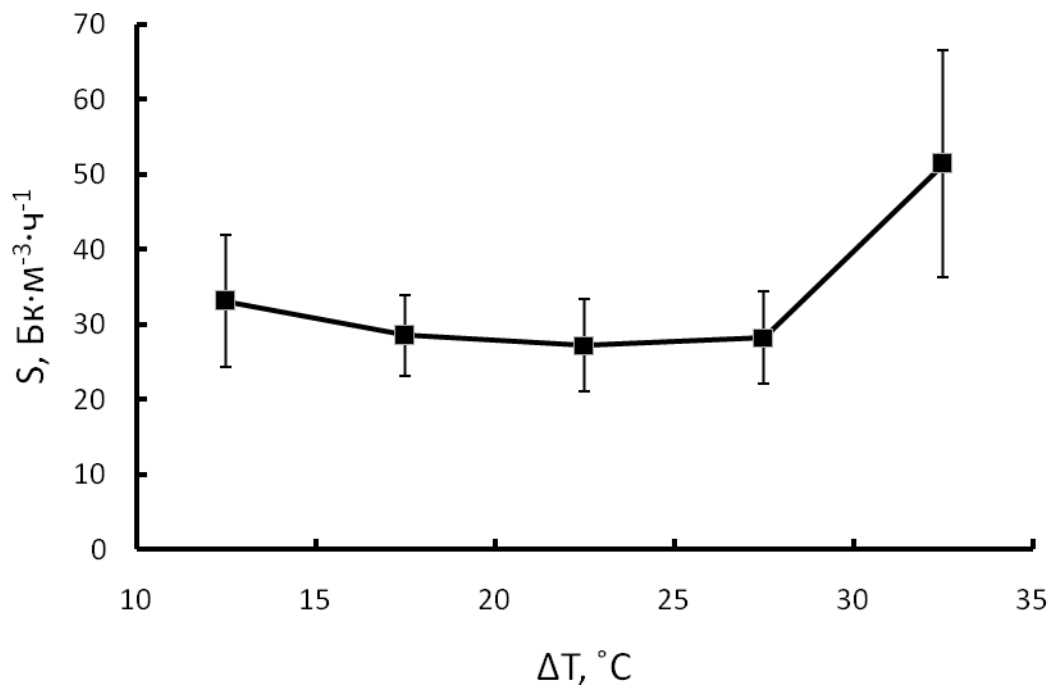


Рисунок 4.6. Зависимость скорости поступления радона в помещение от разности температур ΔT (Помещение 4).

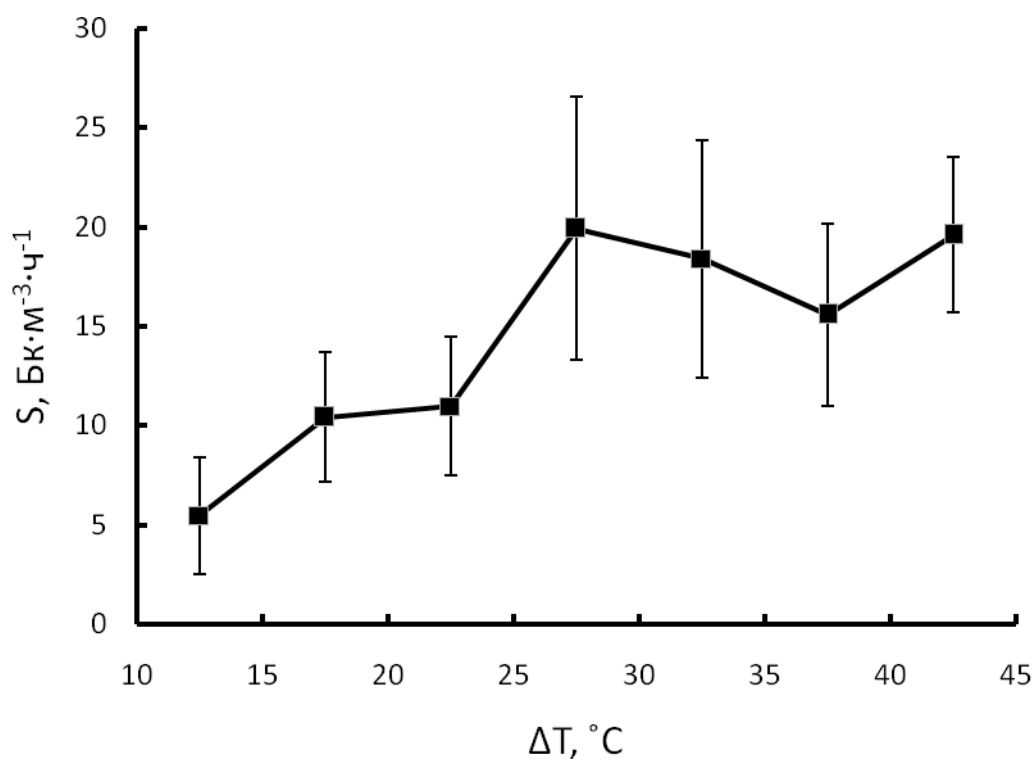


Рисунок 4.7. Зависимость скорости поступления радона в помещение от разности температур ΔT (Помещение 5).

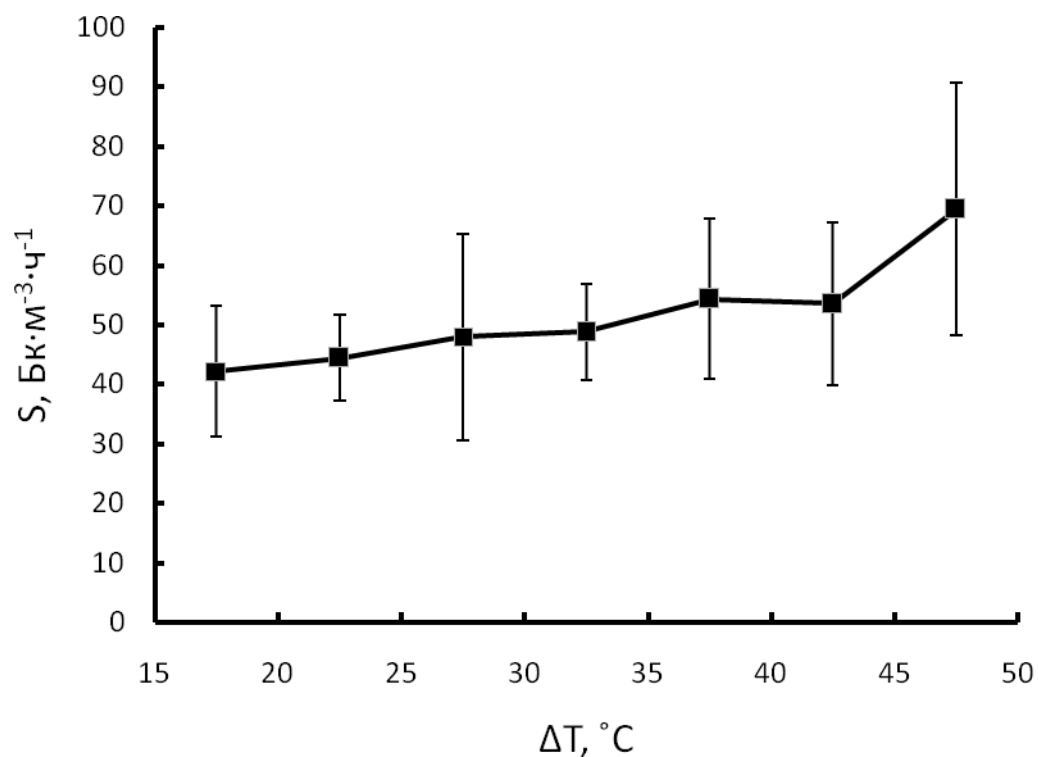


Рисунок 4.8. Зависимость скорости поступления радона в помещение от разности температур ΔT (Помещение 6).

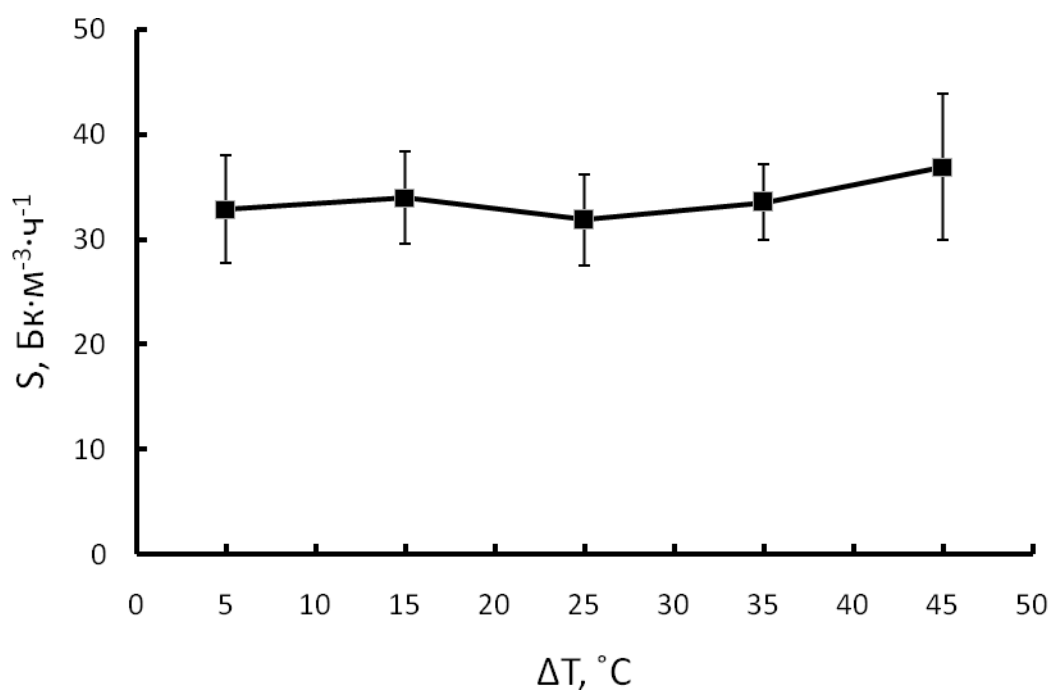


Рисунок 4.9. Зависимость скорости поступления радона в помещение от разности температур ΔT (Помещение 7).

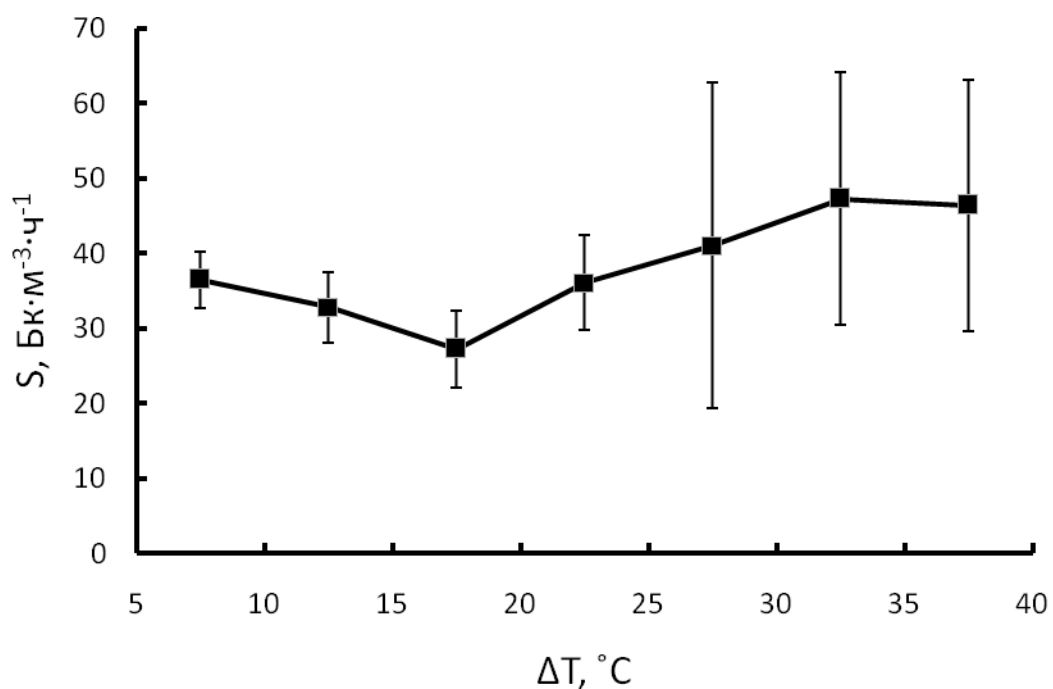


Рисунок 4.10. Зависимость скорости поступления радона в помещение от разности температур ΔT (Помещение 8).

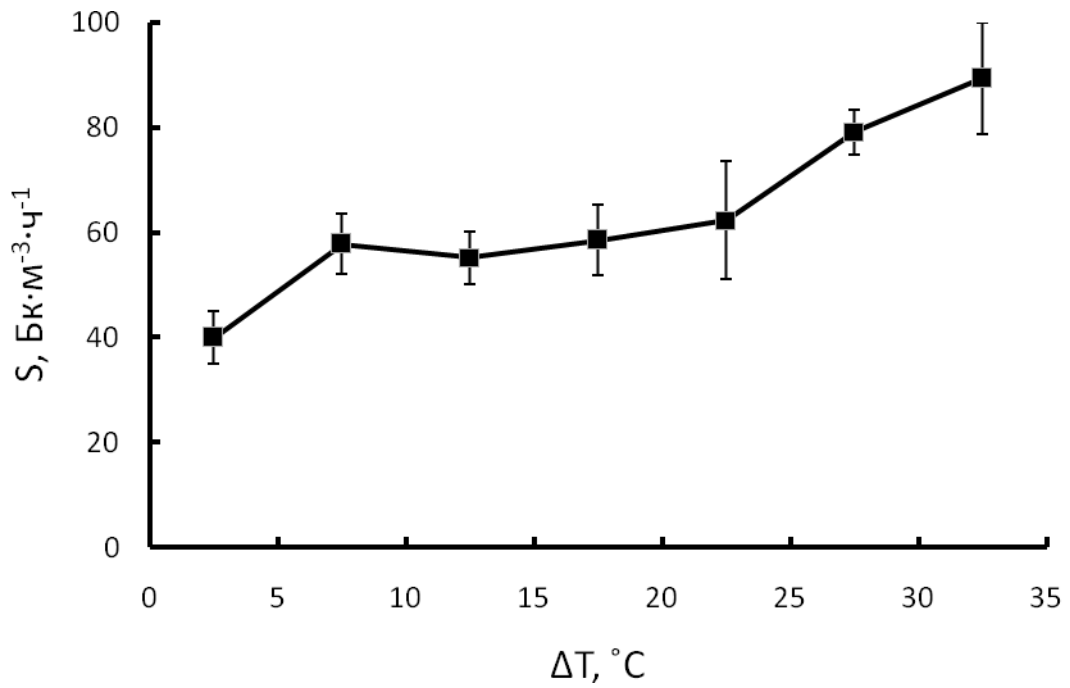


Рисунок 4.11. Зависимость скорости поступления радона в помещение от разности температур ΔT (Помещение 9).

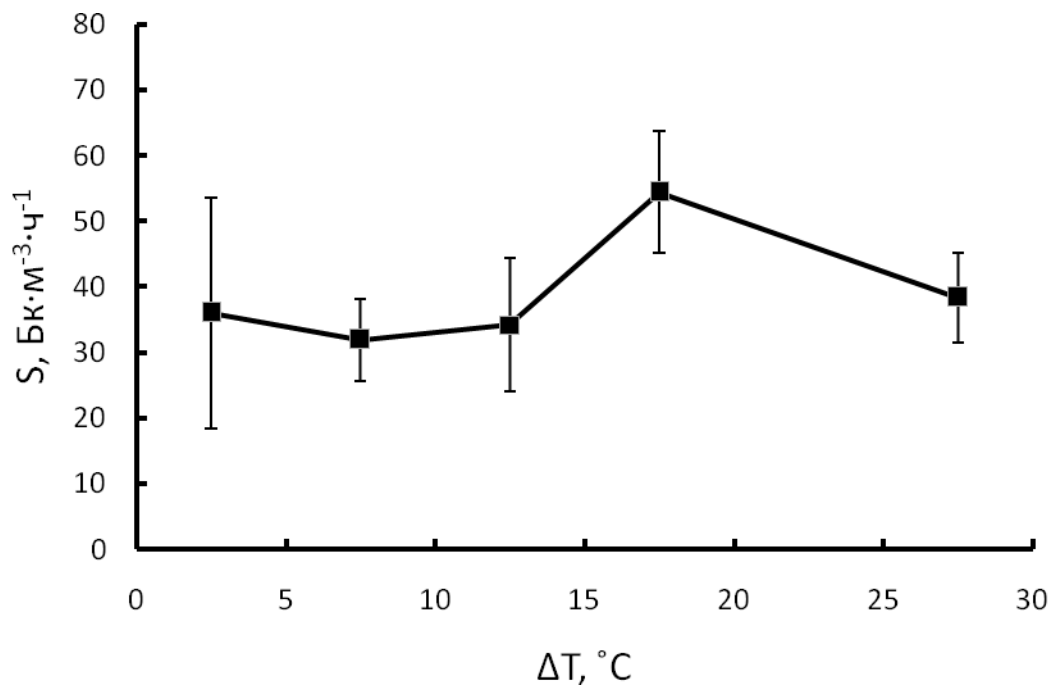


Рисунок 4.12. Зависимость скорости поступления радона в помещение от разности температур ΔT (Помещение 10).

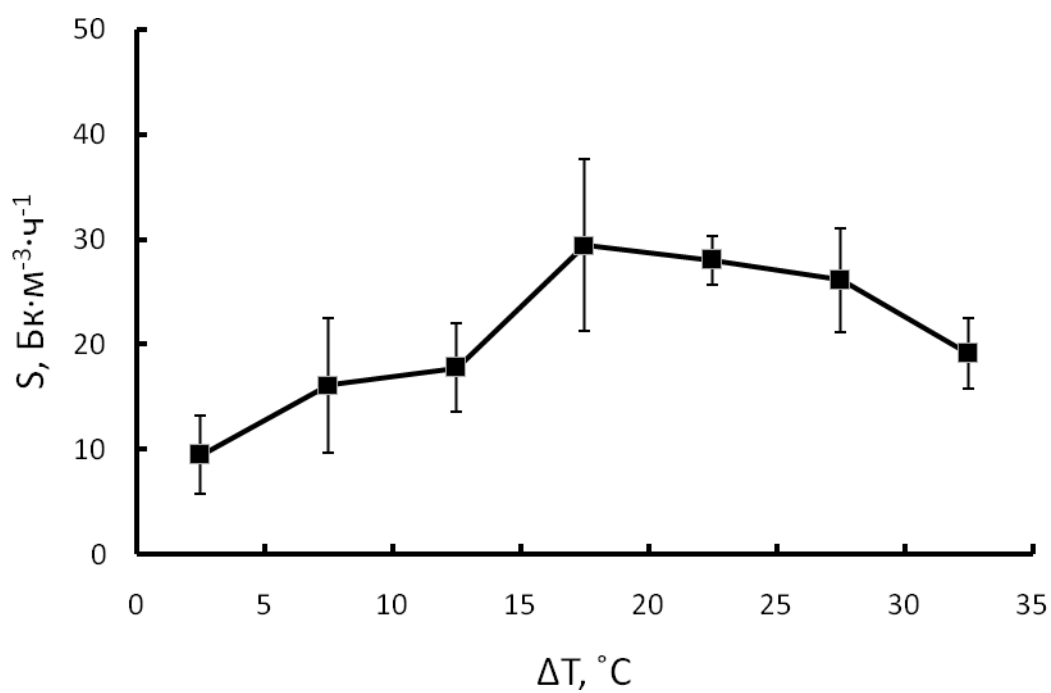


Рисунок 4.13. Зависимость скорости поступления радона в помещение от разности температур ΔT (Помещение 11).

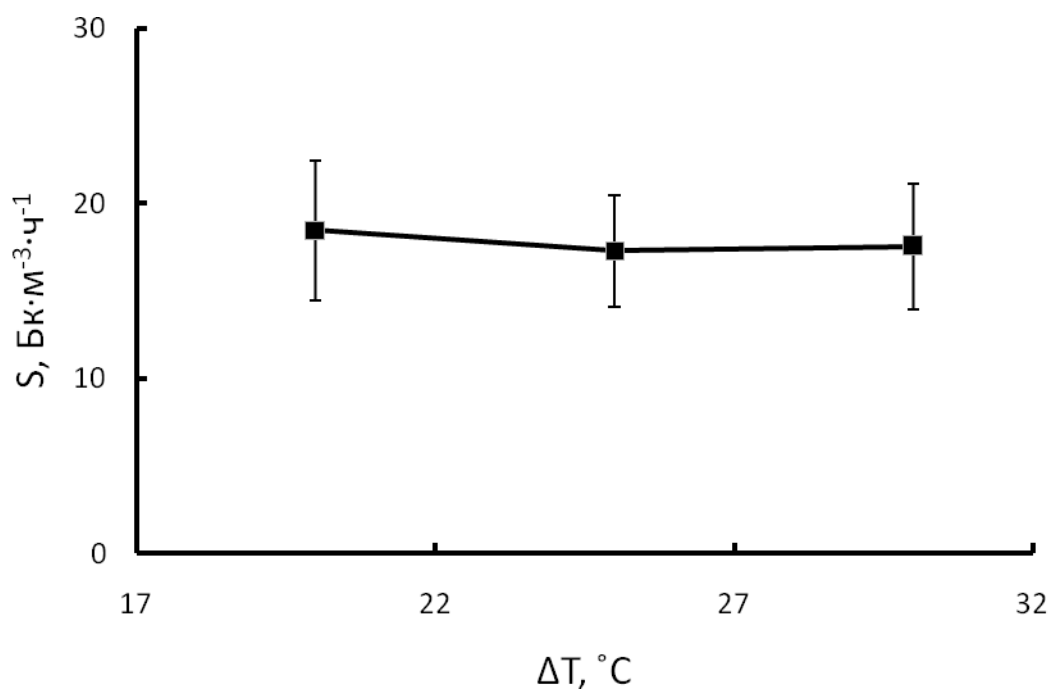


Рисунок 4.14. Зависимость скорости поступления радона в помещение от разности температур ΔT (Помещение 12).

Как можно видеть из рисунков 4.3-4.14, с ростом разности температур скорость поступления радона для помещений 1,2,6,7,8 и 10-12 остается практически неизменной. Диффузионный механизм поступления радона для данных помещений является преобладающим. В помещениях 3-5 и 9 напротив, наблюдается значительный рост скорости поступления радона (так в помещении 5 скорости поступления радона для крайних значений ΔT различаются в четыре раза), что свидетельствует о значительном вкладе конвективного потока. Учитывая расположение этих помещений на 1-3 этажах, причиной данного эффекта может быть дополнительное конвективное поступления радона из подвального помещения с высокой концентрацией радона. Согласно полученным результатам (Таблица 4.2), только треть всех поступлений радона для помещения 5 обусловлена диффузионным механизмом поступления.

Значения КВО в стационарном режиме эксплуатации помещения λ_0 были также сгруппированы по температурным интервалам. Полученные зависимости представлены на рисунках 4.15-4.26 с указанием стандартных отклонений значений.

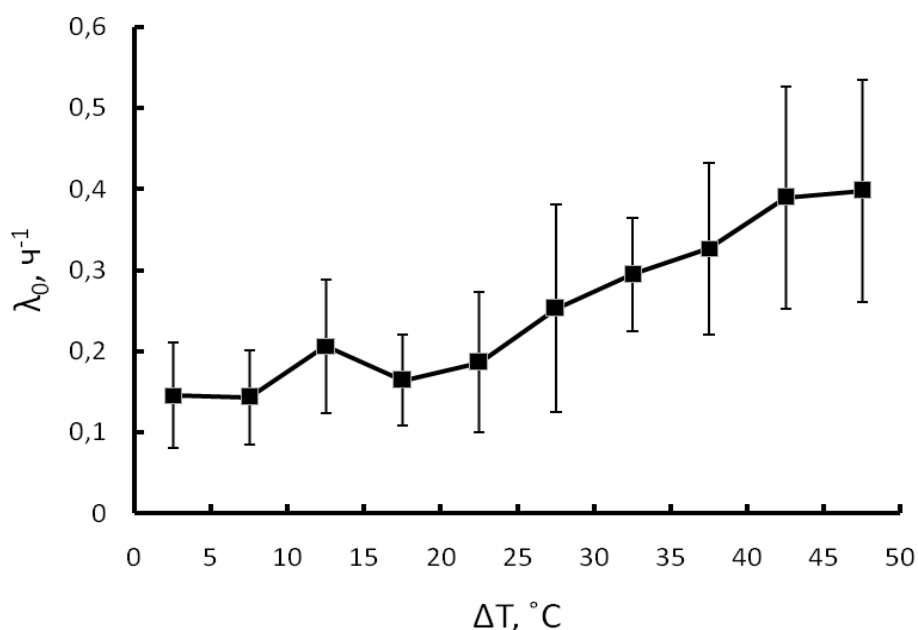


Рисунок 4.15. Зависимость КВО в стационарном режиме эксплуатации помещения λ_0 от разности температур ΔT (Помещение 1).

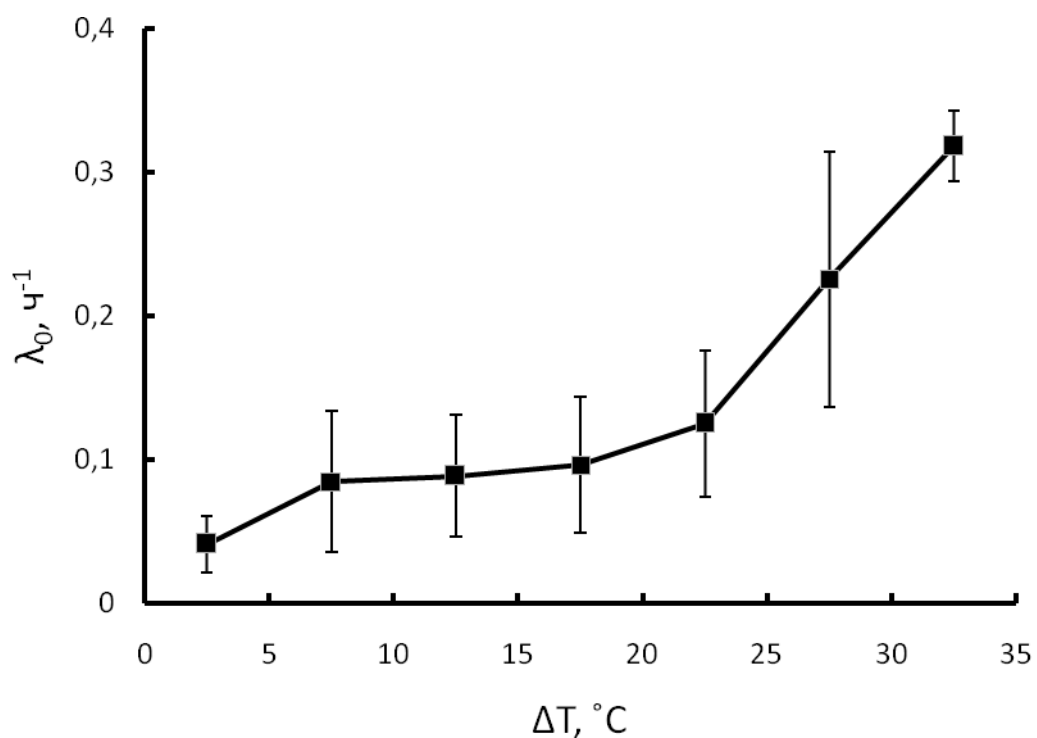


Рисунок 4.16. Зависимость КВО в стационарном режиме эксплуатации помещения λ_0 от разности температур ΔT (Помещение 2).

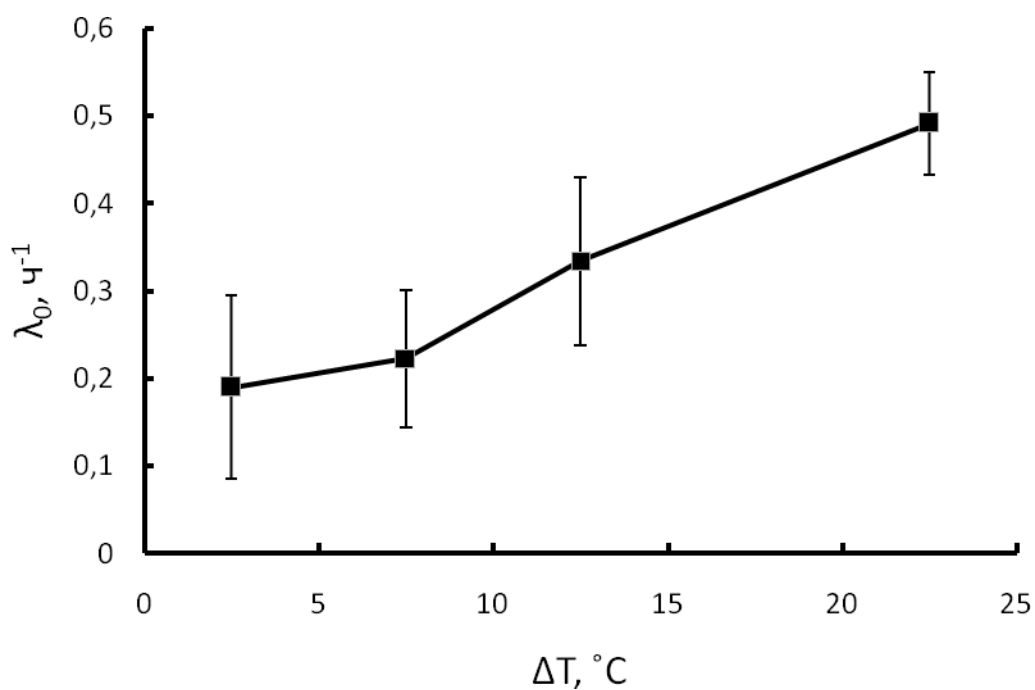


Рисунок 4.17. Зависимость КВО в стационарном режиме эксплуатации помещения λ_0 от разности температур ΔT (Помещение 3).

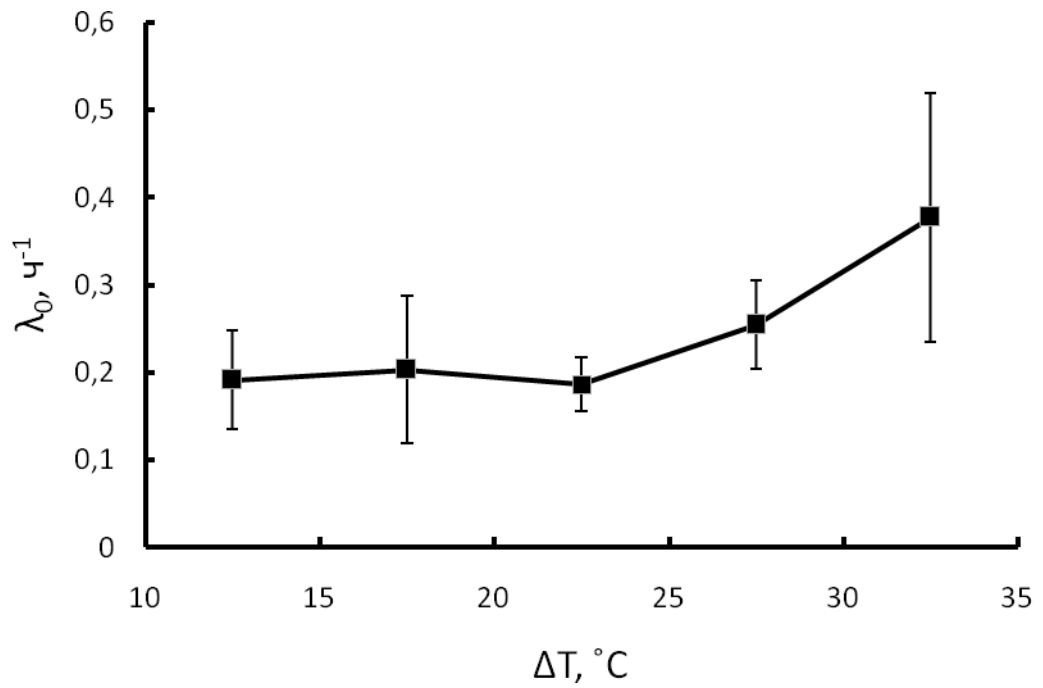


Рисунок 4.18. Зависимость КВО в стационарном режиме эксплуатации помещения λ_0 от разности температур ΔT (Помещение 4).

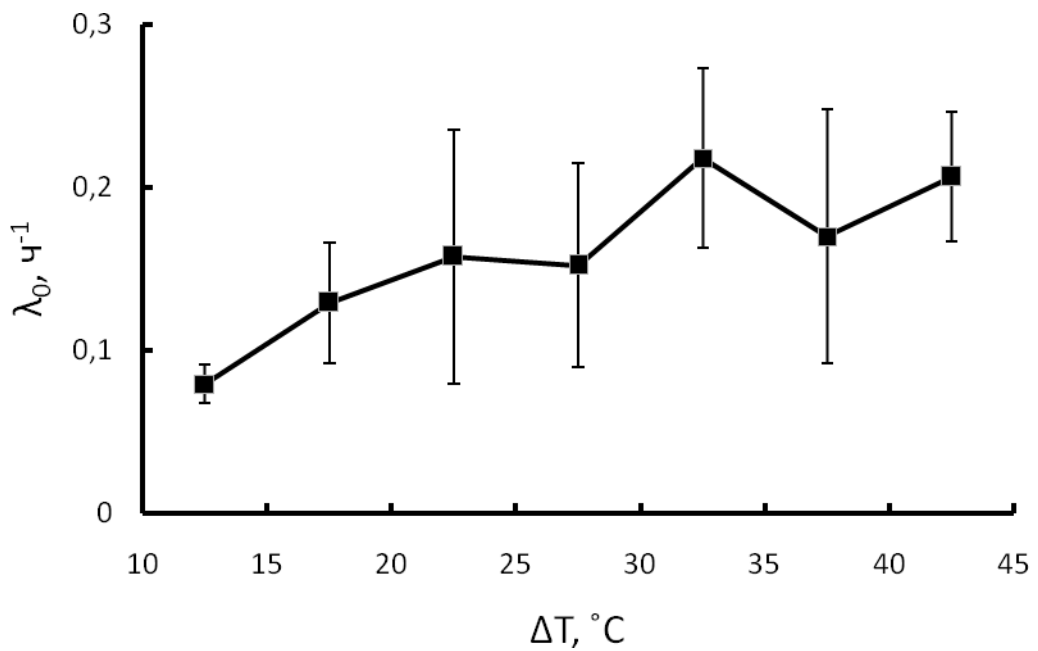


Рисунок 4.19. Зависимость КВО в стационарном режиме эксплуатации помещения λ_0 от разности температур ΔT (Помещение 5).

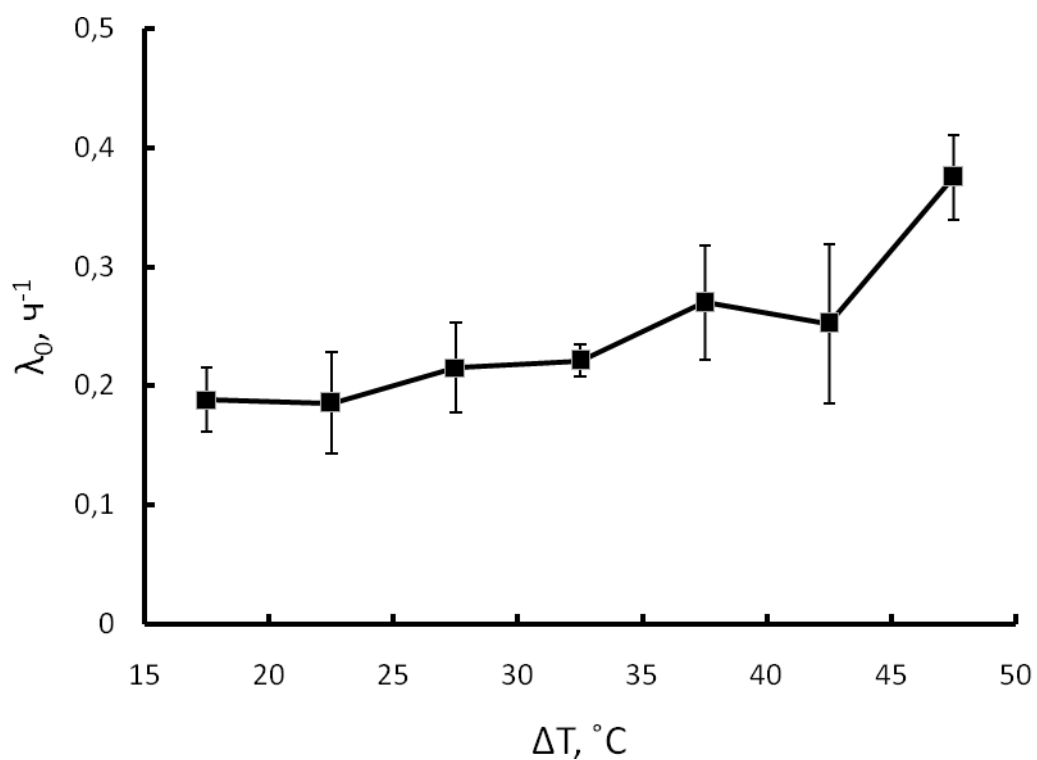


Рисунок 4.20. Зависимость КВО в стационарном режиме эксплуатации помещения λ_0 от разности температур ΔT (Помещение 6).

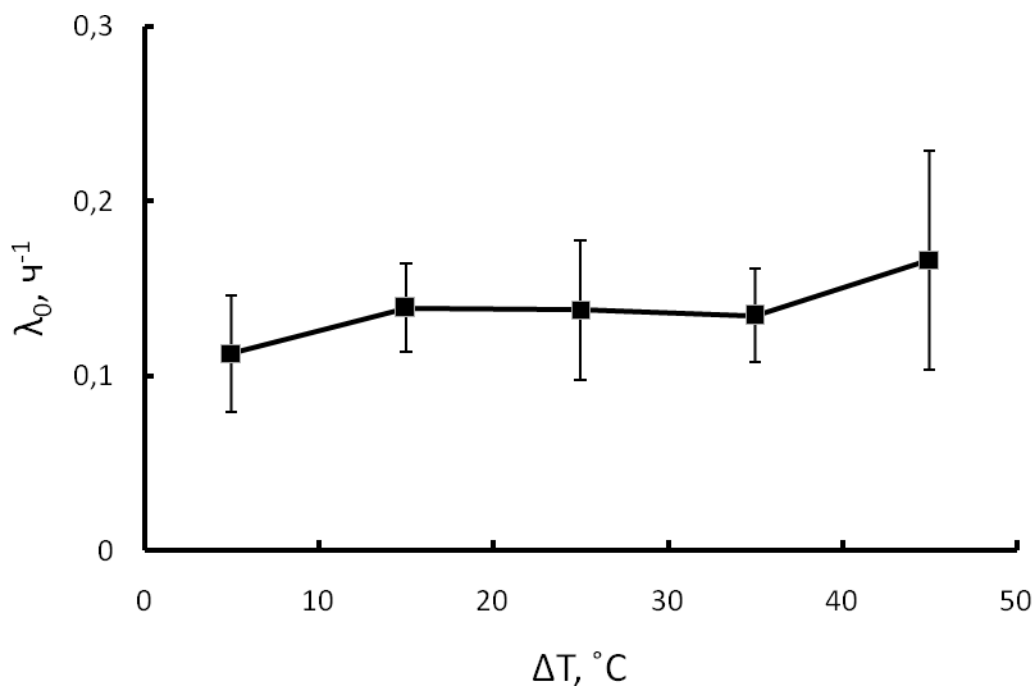


Рисунок 4.21. Зависимость КВО в стационарном режиме эксплуатации помещения λ_0 от разности температур ΔT (Помещение 7).

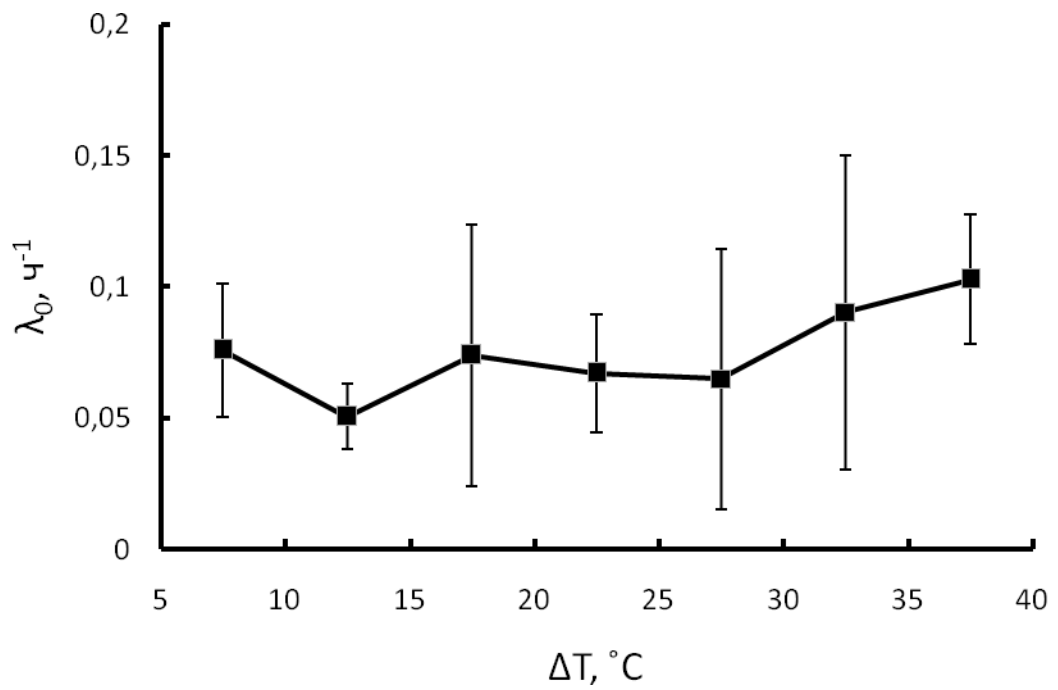


Рисунок 4.22. Зависимость КВО в стационарном режиме эксплуатации помещения λ_0 от разности температур ΔT (Помещение 8).

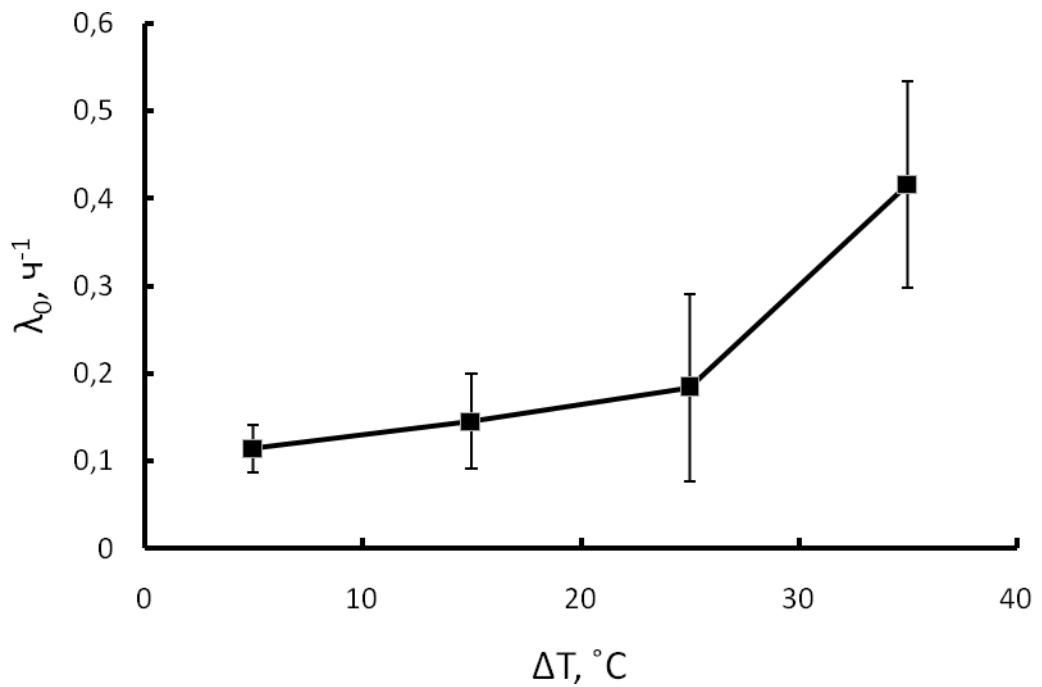


Рисунок 4.23. Зависимость КВО в стационарном режиме эксплуатации помещения λ_0 от разности температур ΔT (Помещение 9).

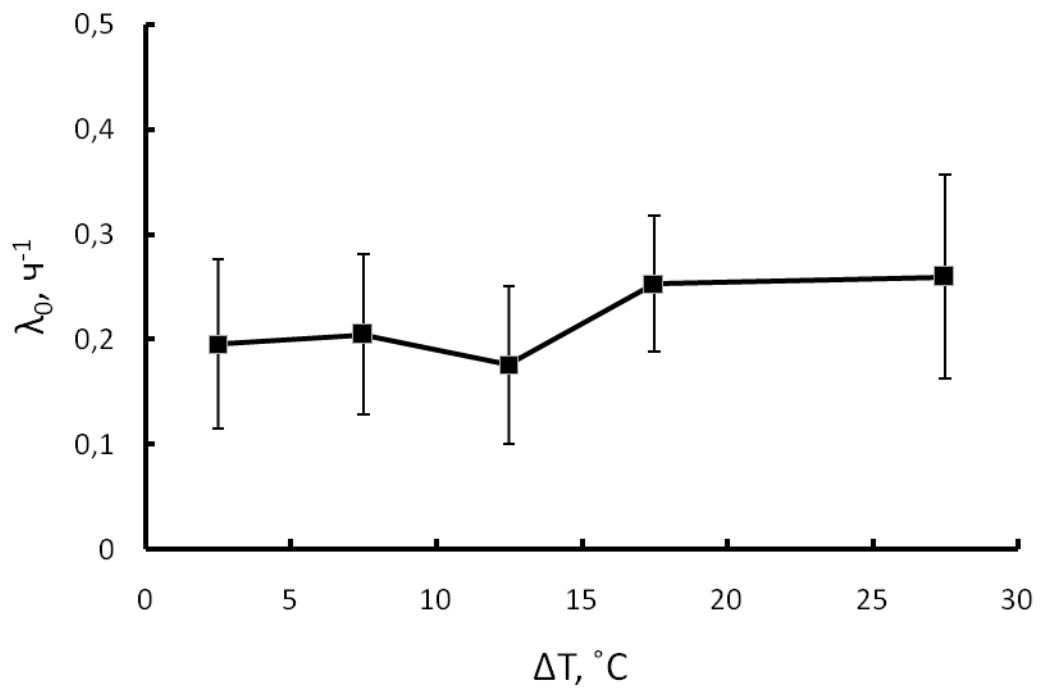


Рисунок 4.24. Зависимость КВО в стационарном режиме эксплуатации помещения λ_0 от разности температур ΔT (Помещение 10).

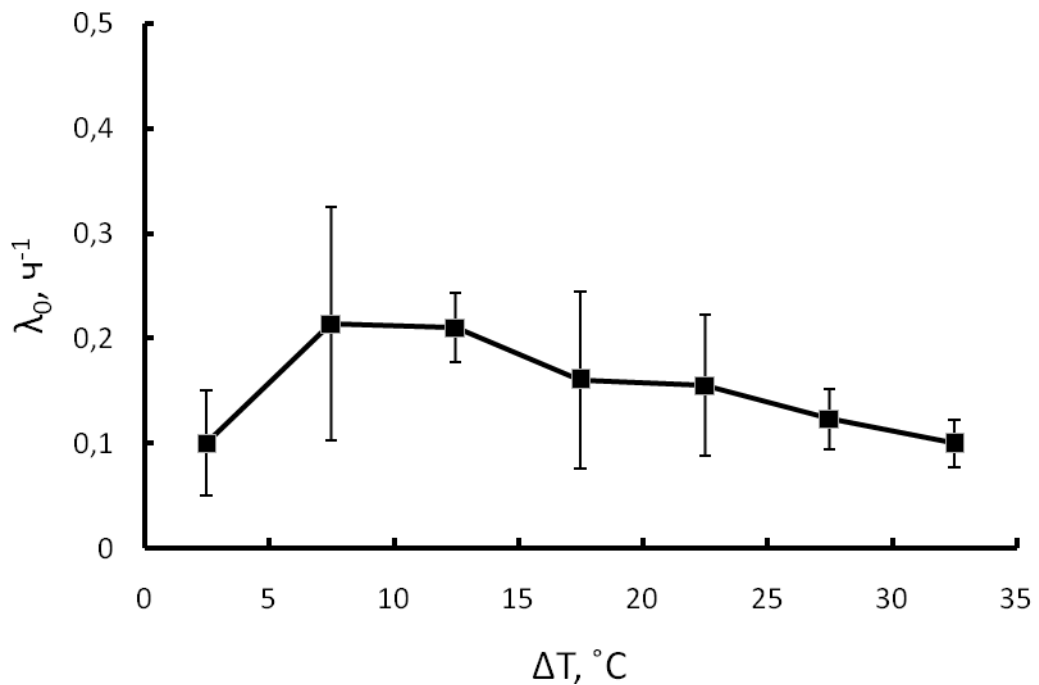


Рисунок 4.25. Зависимость КВО в стационарном режиме эксплуатации помещения λ_0 от разности температур ΔT (Помещение 11).

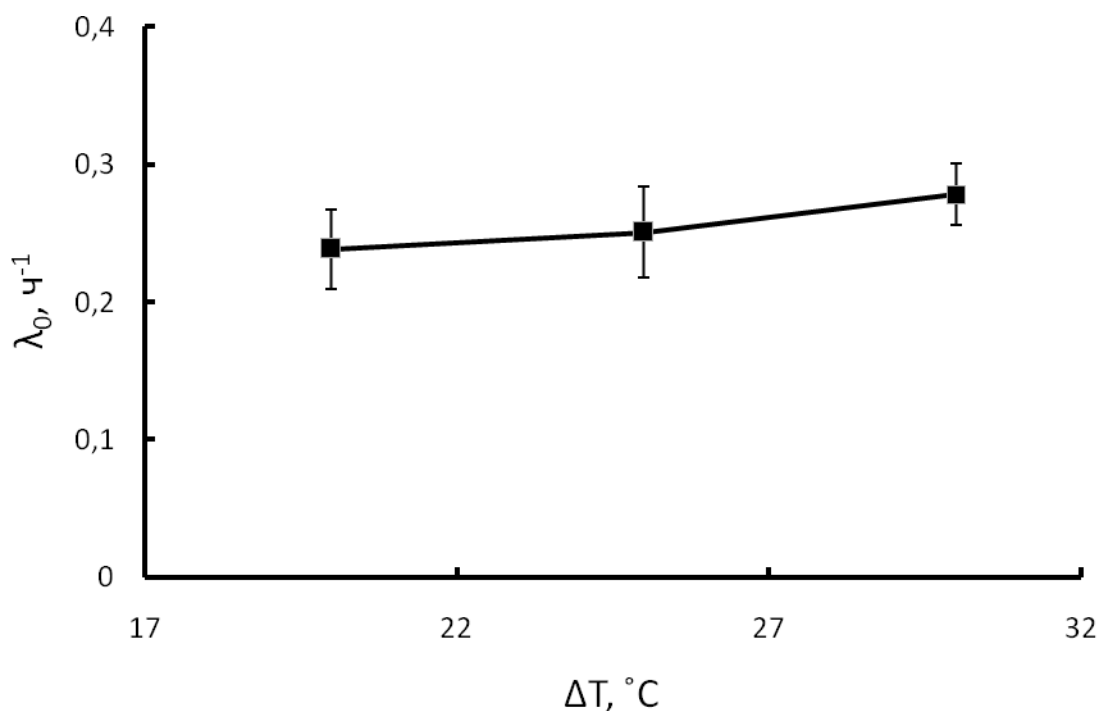


Рисунок 4.26. Зависимость КВО в стационарном режиме эксплуатации помещения λ_0 от разности температур ΔT (Помещение 12).

При высоких значениях ΔT практически для всех обследованных помещений (1-10, Рис. 4.15-4.24) наблюдался рост КВО в стационарном состоянии помещения.

Была проведена оценка соответствия полученных результатов модели, предложенной в [87]. В работе [87] представлена модель, описывающая КВО λ_v , обусловленную разностью температур ΔT :

$$\lambda_v = \frac{\Pi_{\text{нар}}^{\text{эфф}}}{V} \sqrt{(f_{\text{sr}} \Delta T^{0,65})^2 + (f_{\text{вр}} v)^2}, \quad (4.1)$$

где f_{sr} - стек-параметр, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot (\text{°C})^{-1/2}$; $f_{\text{вр}}$ - безразмерный ветровой параметр; v - метеорологическая скорость ветра, м/с.

Значение показателя степени 0,65 при ΔT является усредненной величиной, полученной на основании натуральных измерений [91]. При турбулентном потоке

поступления этот показатель равен 0,5; при ламинарном – 1,0. Параметры f_{sr} и f_{wr} для условий умеренного северного климата и естественной вентиляции равны 0,08 и 0,11 соответственно [56,87]. При таких значениях параметров и скорости ветра 3 м/с наблюдаемая зависимость КВО λ_0 от разности температур ΔT хорошо соответствует модели (Рисунок 4.27).

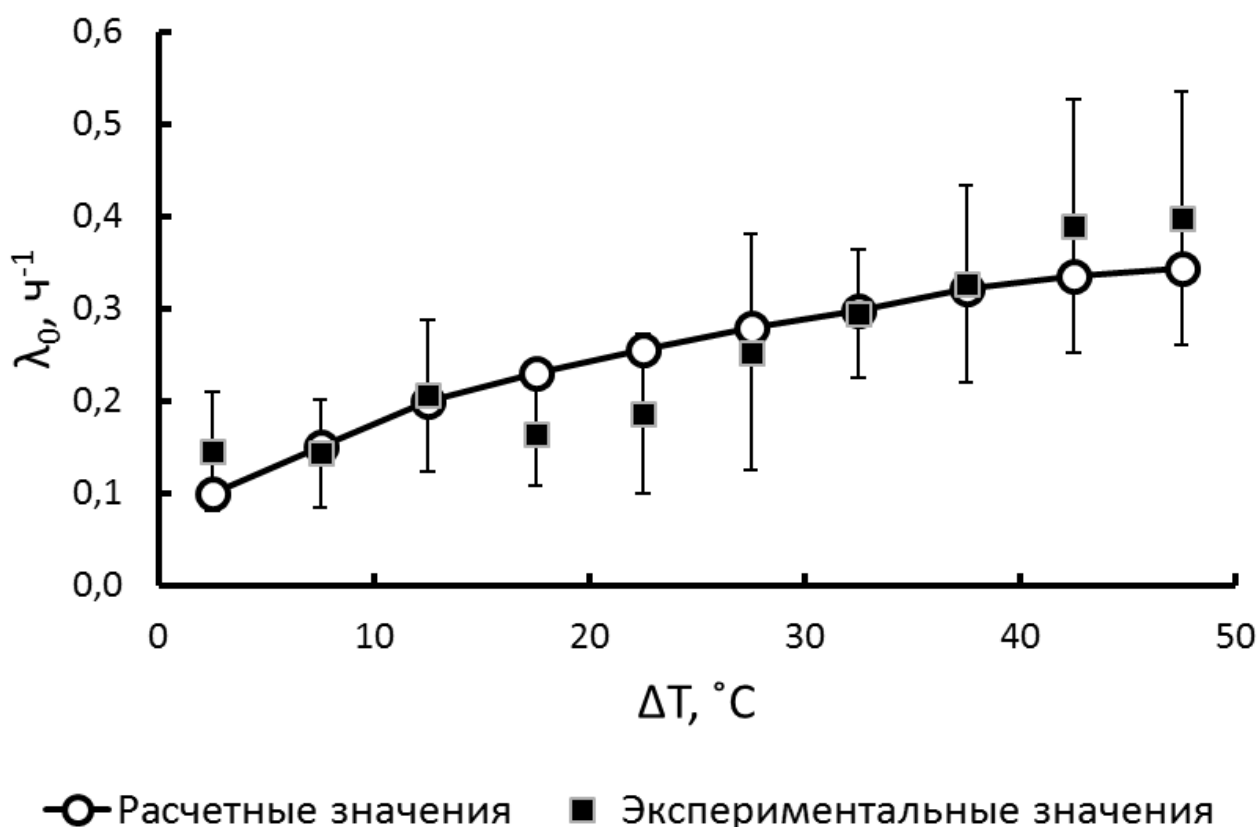


Рисунок 4.27. Сравнение теоретического и экспериментального вида зависимостей минимальной кратности воздухообмена от ΔT (на примере помещения 1).

Как можно видеть из таблицы 4.2, средний уровень КВО в стационарном режиме эксплуатации помещений (соответствующий закрытому помещению) составляет величину порядка $0,2 \text{ ч}^{-1}$, что хорошо согласуется с оценками, полученными на основании теоретического моделирования и экспериментальных оценок для закрытых помещений [11,91-93]. Также в

работах [11,91,92] показано, что к снижению КВО до величин порядка $0,2 \text{ ч}^{-1}$ приводит использование многослойных стеклопакетов и притворов с двойным уплотнением.

4.3. Анализ полученных результатов

Как можно видеть из таблицы 4.2, концентрации радона в современных зданиях (помещения 6-12, построенные после 2000 года) значительно превышают средние значения, полученные в помещениях зданий г. Екатеринбурга. Средний уровень концентрации радона в выборке (133 Бк/м^3) более чем в три раза превышает средний уровень концентрации радона в зданиях города, построенных до введения требований к энергосберегающему строительству (38 Бк/м^3).

Существенный интерес представляет ситуация в помещениях многоквартирных домов, построенных с 2007 по 2012 гг. (помещения 6-10, Таблица 4.2). В этих помещениях получены максимальные значения скорости поступления радона. При этом основная часть поступлений обусловлена диффузионным механизмом поступления. Учитывая, что измерения проводились на верхних этажах, основным источником радона являются материалы ограждающих конструкций.

Как было показано в разделе 2.1, содержание радия-226 в современных строительных материалах находится на уровне УА радия-226 в материалах, использованных до введения требований к энергосбережению. Однако прямой зависимости между УА и скоростью поступления радона нет, поскольку скорость поступления также зависит от конкретной внутренней структуры материала. Например, бетон более низкой плотности, но с более пористой структурой может иметь повышенную скорость поступления радона [64]. В исследовании [65] было показано, что использование в помещении бетонного

пола, по весу на 25% состоящего из золы, привело к удвоению концентрации радона по сравнению с помещениями с контрольным бетонным полом.

Согласно полученным результатам, типичное значение КВО, приводящее к накоплению радона в закрытом помещении (находящимся в стационарном режиме эксплуатации), равно $0,2 \text{ ч}^{-1}$. В свою очередь деятельность человека в активном режиме эксплуатации помещения, как правило, приводит к снижению концентраций радона. Как отмечается в работе [94], на формирование воздухообменного процесса наибольшее воздействие оказывает повседневная деятельность человека, “не регулярно и не в равной степени, влияющего на воздушно-тепловое состояние помещения в своем жилище”.

Таким образом, причины высоких концентраций радона в современных зданиях нужно искать в режимах эксплуатации помещений и характеристиках строительных конструкций (таких как коэффициенты диффузии радона в строительных конструкциях, коэффициенты эманирования и пористость материалов).

Выводы

1. Опробован инструментальный способ определения скорости поступления радона и параметров воздухообмена в атмосфере помещений.
2. Показано, что изучение зависимости скорости поступления радона в помещение от разности температур ΔT (между внутренним объемом помещения и внешней атмосферой) позволяет оценить соотношение между потоками поступления радона (диффузионным и конвективным).
3. Согласно проведенному анализу, основными факторами, приводящими к накоплению радона в помещениях современных зданий являются диффузионное поступление радона из строительных материалов и низкая КВО.

Глава 5. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА СОДЕРЖАНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ НА КОНЦЕНТРАЦИИ РАДОНА

5.1. Характер и периодичность изменения концентрации радона в помещении

Временной ряд изменения концентрации радона в помещении представляет собой набор как периодических, так и непериодических сигналов. Концентрация радона в помещении является величиной, претерпевающей существенные суточные, кратковременные (3 – 7 сут.), сезонные (~ 6 мес.) и долговременные (от 2 – 3 до 20 – 30 лет) вариации [86,95,96]. Суточные и сезонные циклы изменения концентрации радона в помещении обычно считаются результатом стек-эффекта (эффекта дымовой трубы), который приводит к более высоким концентрациям радона по ночам и в зимнее время [97,98]. Тем не менее, сам по себе сезонный цикл измерений концентрации радона может показать значительные различия из года в год, что указывает на влияние непериодических факторов [99]. Более того, межгодовая изменчивость средних уровней концентраций радона может составлять до 50% [100]. Причины могут быть найдены во влиянии метеорологических факторов [91,97,101-103] и в поведении жильцов [104], например, тенденция открывать окна летом и держать их закрытыми в зимний период, что в целом приводит к более высоким уровням концентрации радона зимой. Таким образом, при оценке параметров, определяющих концентрации радона в помещениях необходимо учитывать такие факторы как метеорологические параметры и режим содержания помещения.

На основании продолжительных измерений концентраций радона в четырех помещениях жилых зданий и в четырех помещениях зданий офисного типа (помещения 1-8, Таблица 4.1) был проведен статистический анализ. Целью анализа было выявление характерных периодов во временном ряду

концентраций радона и вспомогательных измерений (температур внутри и снаружи помещения, влажности, разности давлений между внутренним объемом помещения и наружной атмосферой).

В качестве максимального периода, поддающегося определению, был выбран период равный 7 сут. Более длинные периоды не рассматривались, так как для их выявления полугодовых серий измерений недостаточно. Тем не менее, для некоторых помещений о характере сезонных изменений можно судить по распределению значений концентраций радона, соответствующих теплому и холодному сезонам [105].

Сезонные распределения концентраций радона показаны на рисунке 5.1 на примере помещения 7. Для данного помещения периоды измерений как для теплого, так и холодного периодов составили не менее 90 суток (временной ряд был условно разделен на сезоны: теплый с 1 мая по 30 сентября и холодный с 1 октября по 30 апреля). Границы теплого и холодного сезонов были выбраны применительно к Уральскому региону и примерно соответствуют началу и окончанию отопительного сезона. Как можно видеть из рисунка 5.1 значения концентраций радона в пределах сезона претерпевают существенные вариации.

Помимо этого, для теплого и холодного сезонов также отличается вид распределения концентраций радона. В разделе 4.2 для помещения 7 было доказано преобладание диффузионного механизма поступления. Из физики процессов поступления и стока радона в помещении, следует, что при доминировании диффузионного механизма поступления и неизменных условиях воздухообмена, значения концентрации радона в теплый период должны превышать соответствующие величины для холодного периода года [105]. Однако средние значения концентраций радона в помещении 7 для различных периодов измерений составляют 121 Бк/м^3 и 161 Бк/м^3 для теплого и холодного сезонов соответственно. В связи с этим можно сделать вывод, что основное влияние на сезонные вариации концентраций радона в данном жилом

помещении оказывает режим его эксплуатации при повышенном уровне вентиляции в теплый период года.

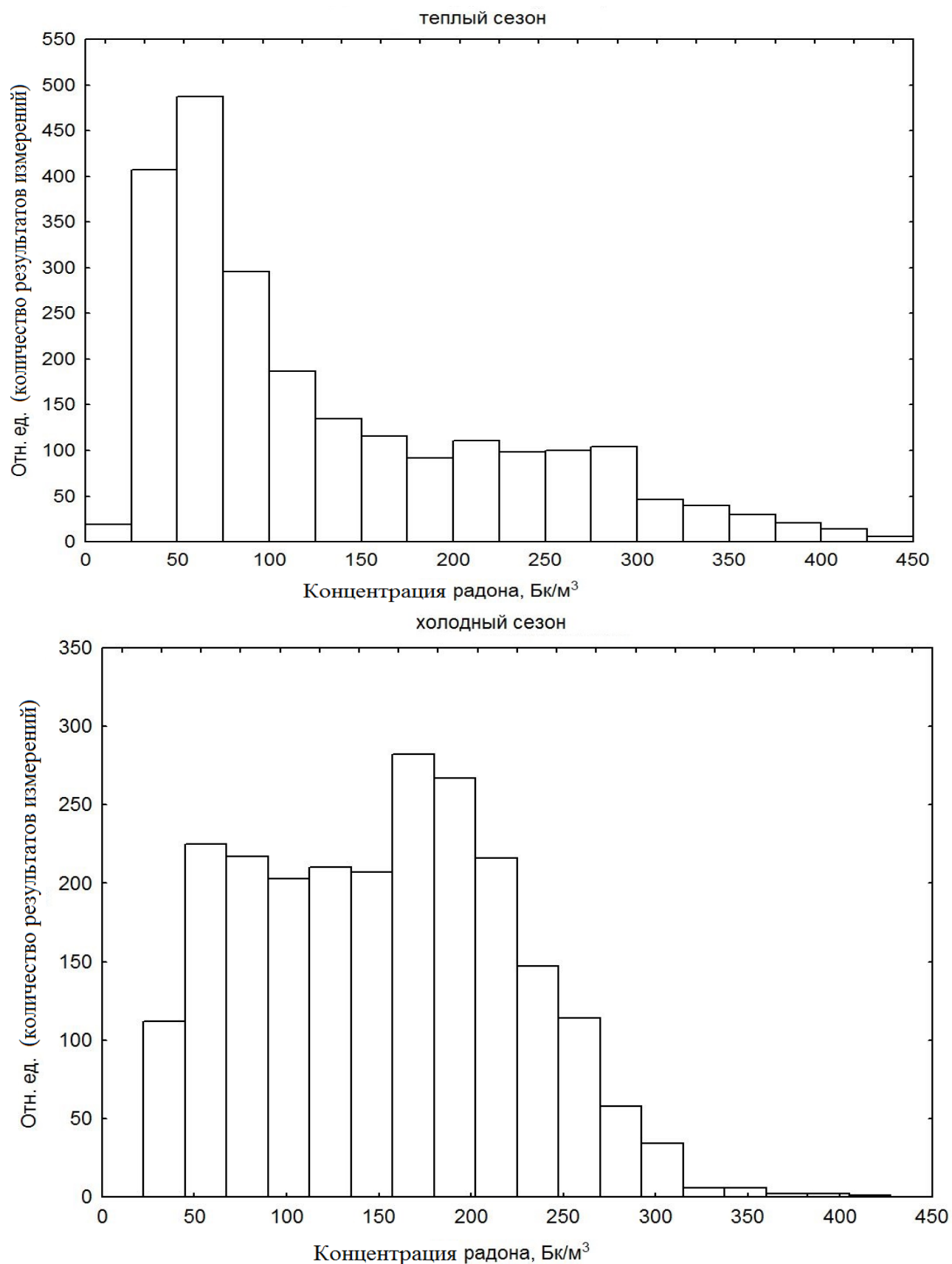


Рисунок 5.1. Сезонные распределения концентрации радона (Помещение 7).

На рисунках 5.2-5.3 для двух обследованных помещений жилого и офисного типа (помещения 8 и 4, Таблица 4.1) изображены временные зависимости концентрации радона, основанные на значениях, сгруппированных по времени. Каждая из точек кривой для помещений получена на основании 24 измерений, соответствующих измерению в определенный час и день недели (на рисунках указаны стандартные ошибки и стандартные отклонения полученных средних значений). Как видно из рисунков, 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.

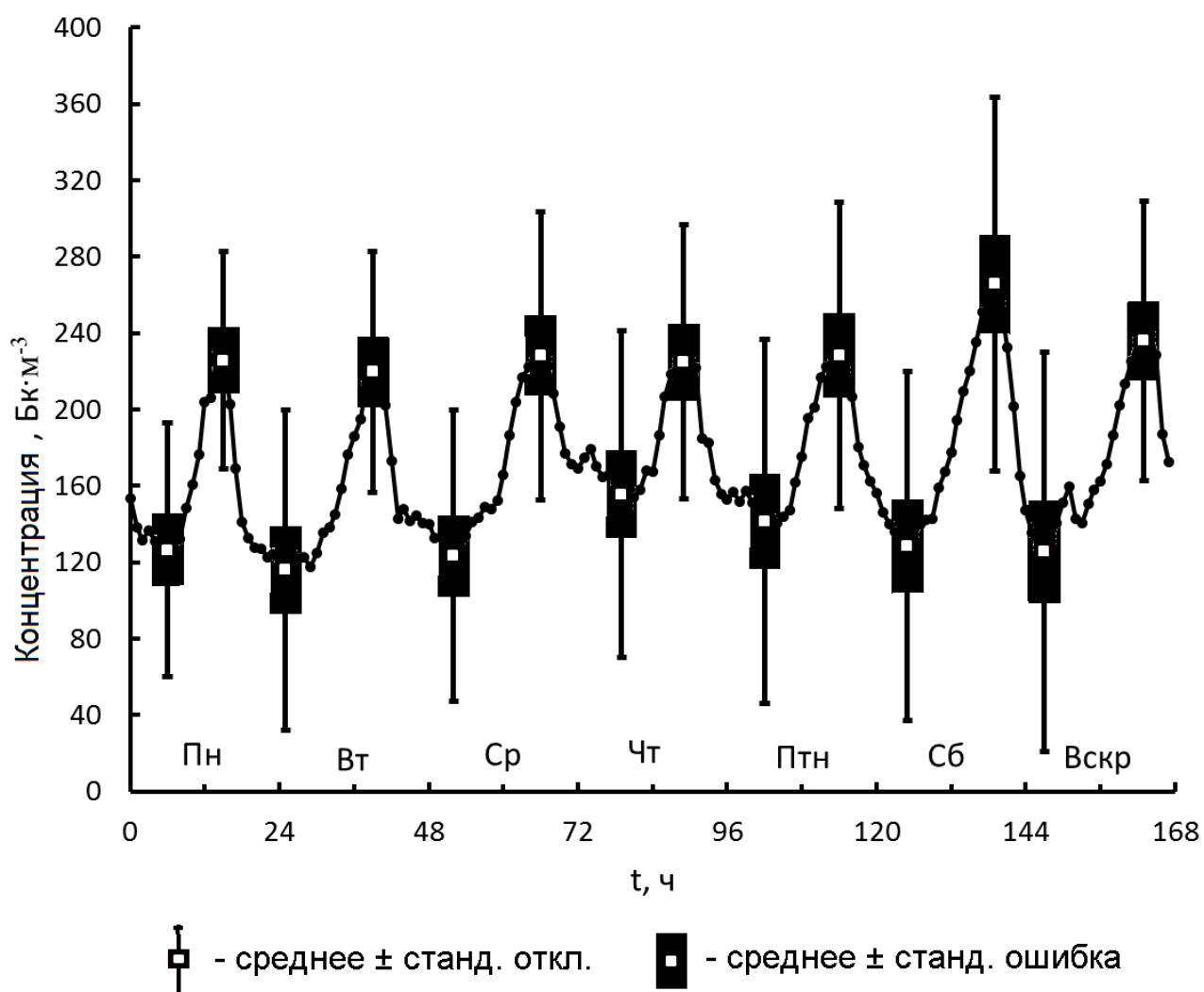


Рисунок 5.2. Изменение концентраций радона сгруппированных по часам для помещения 8 (жилое).

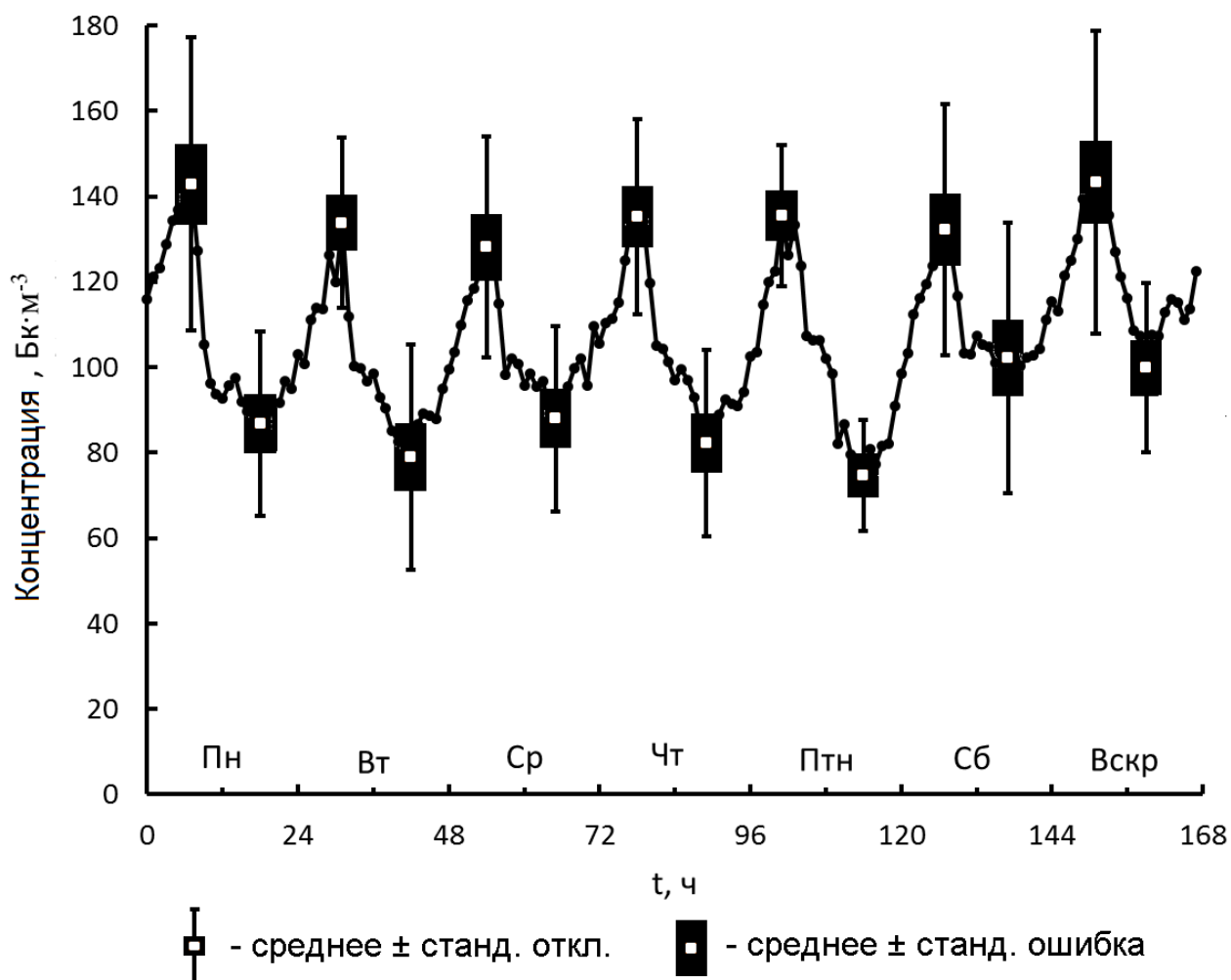


Рисунок 5.3. Изменение концентраций радона сгруппированных по часам для помещения 4 (офисное).

Учитывая, что в помещении 8, согласно результатам опроса жильцов (Таблица 5.1), в рабочее время людей в квартире не находилось, можно предположить существенное влияние деятельности человека на уровни концентрации радона в помещении. На рисунке 5.2 участки с наиболее высокими концентрациями радона соответствуют временным интервалам отсутствия жильцов в дневное время.

На рисунке 5.3, соответствующем помещению офисного типа, можно наблюдать иной характер динамики концентрации радона для субботы и воскресенья. В эти дни людей в помещении не находилось. Однако изменения в концентрациях радона в дневные и ночные часы для выходных дней при

отсутствии людей также прослеживаются, что свидетельствует о влиянии метеорологических факторов.

Для анализа периодичности изменения метеорологических параметров совместно с измерениями концентраций радона в помещении 4 при помощи AlphaGUARD MultisensorUnit производилось измерение температуры наружного воздуха, атмосферного давления, разности давлений между внутренним объемом здания и наружной атмосферой. Описание структуры временной зависимости концентрации радона и других измеренных параметров проводилось для помещения 4 при помощи автокорреляционной функции. На рисунках 5.4-5.8 изображены автокорреляционные функции для различных измеренных параметров, демонстрирующие статистическую взаимосвязь между величинами из одного ряда, но взятыми со сдвигом $Lag(d)$ (временным лагом).

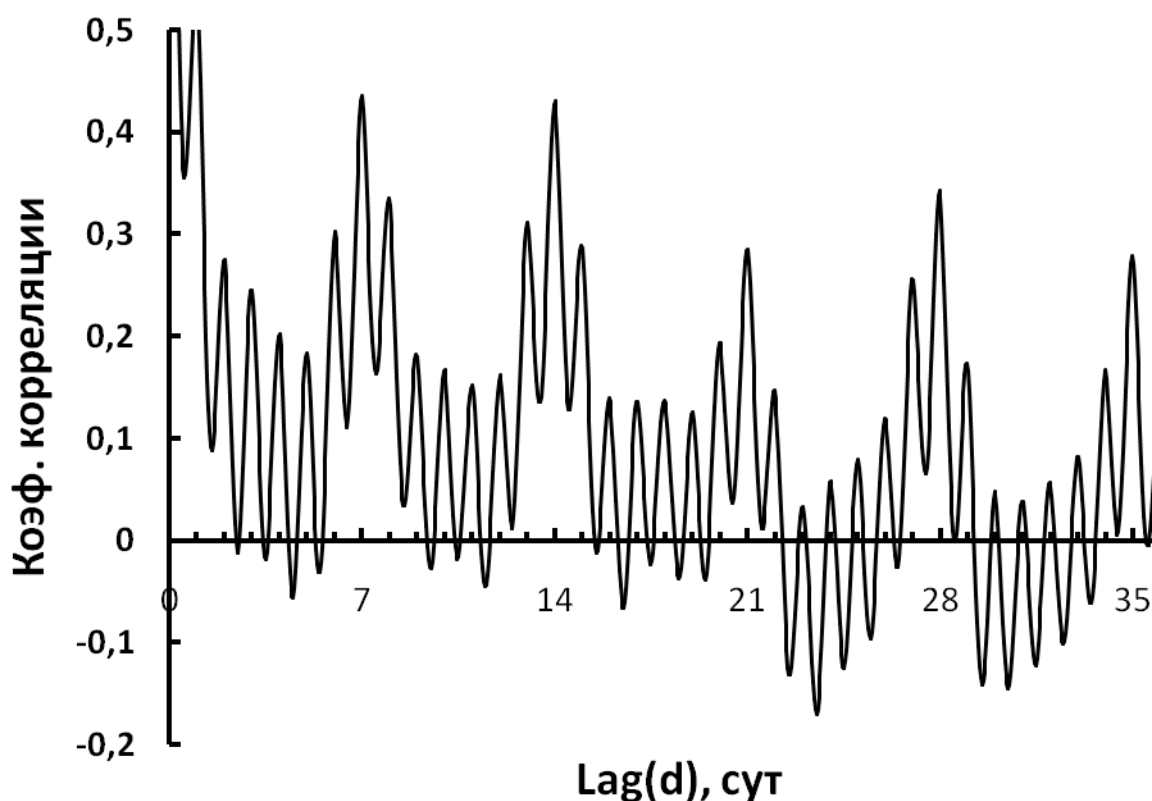


Рисунок 5.4. Коррелограмма для автокорреляционной функции временного ряда измеренных значений концентрации радона.

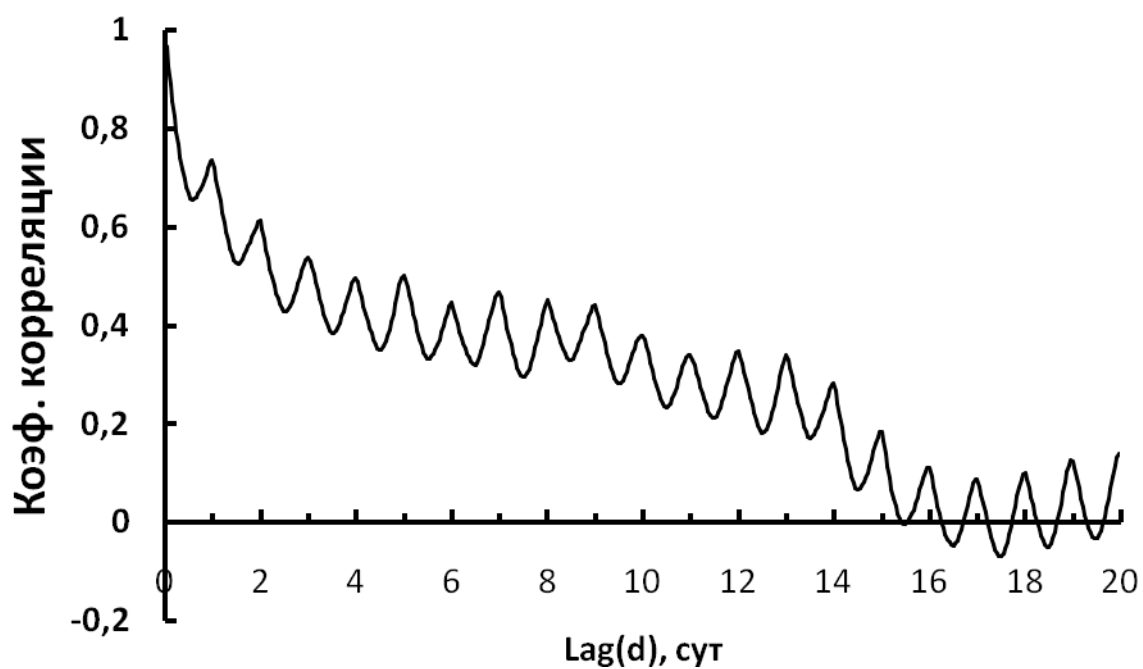


Рисунок 5.5. Коррелограмма для автокоррелляционной функции временного ряда измеренных значений температуры внутри помещения.

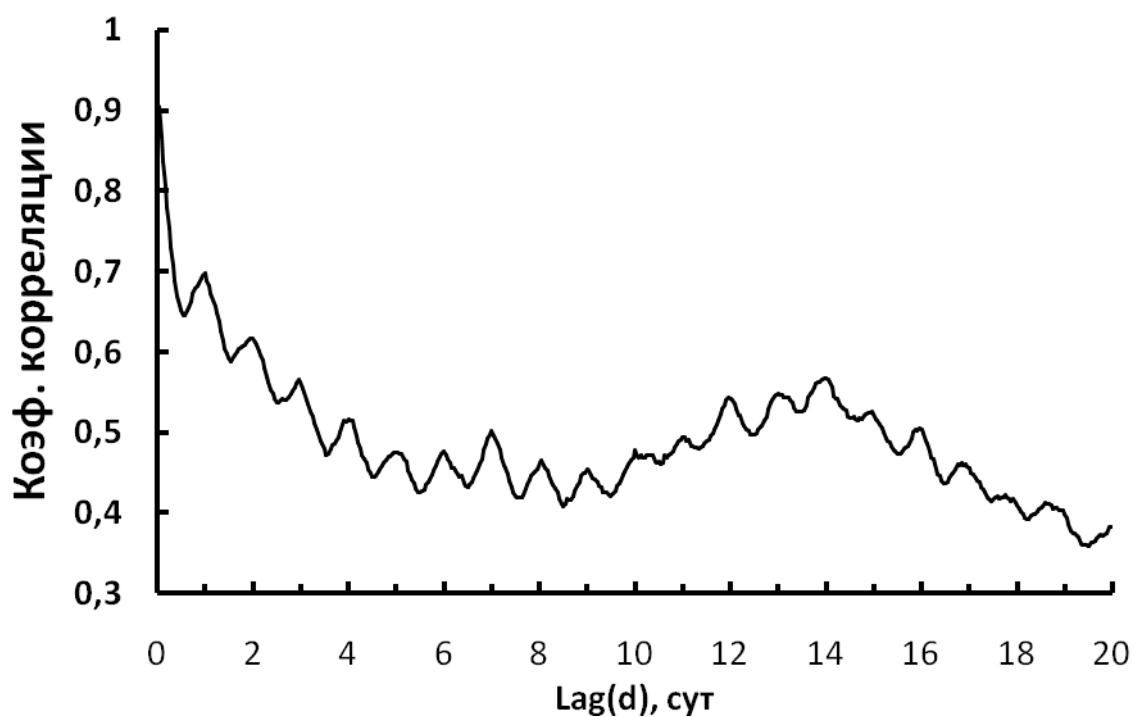


Рисунок 5.6. Коррелограмма для автокоррелляционной функции временного ряда измеренных значений разности давлений между внутренним объемом здания и наружной атмосферой.

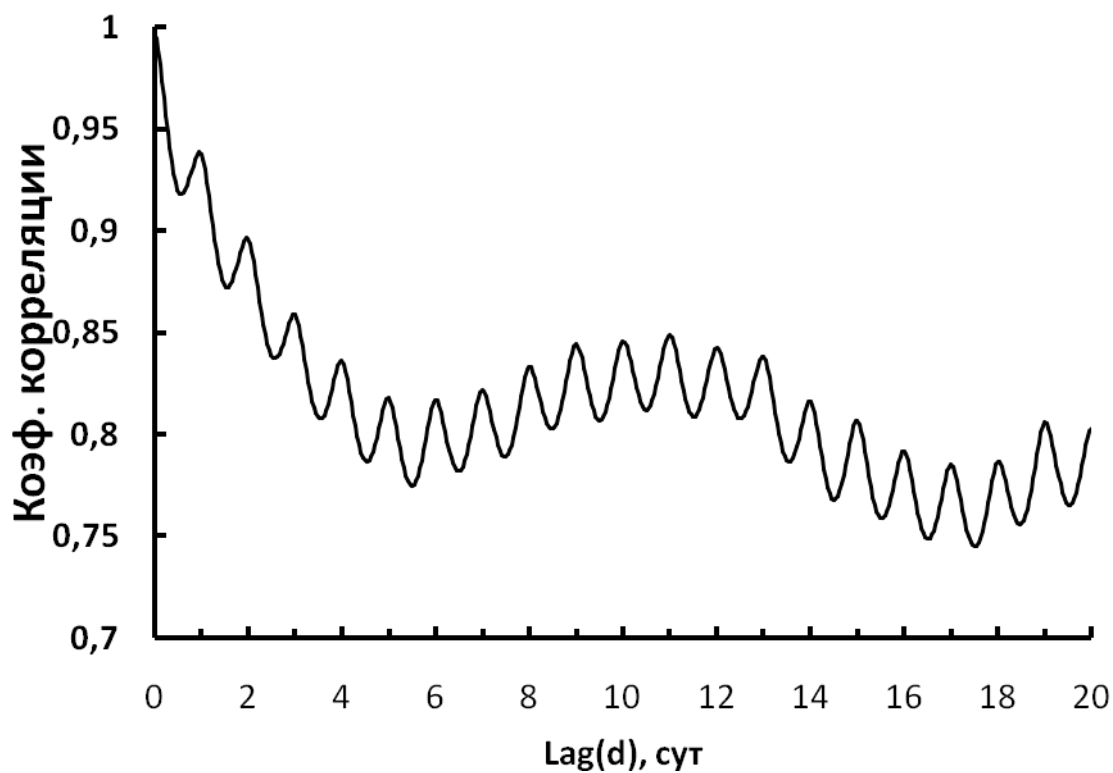


Рисунок 5.7. Коррелограмма для автокорреляционной функции временного ряда измеренных значений температуры снаружи помещения.

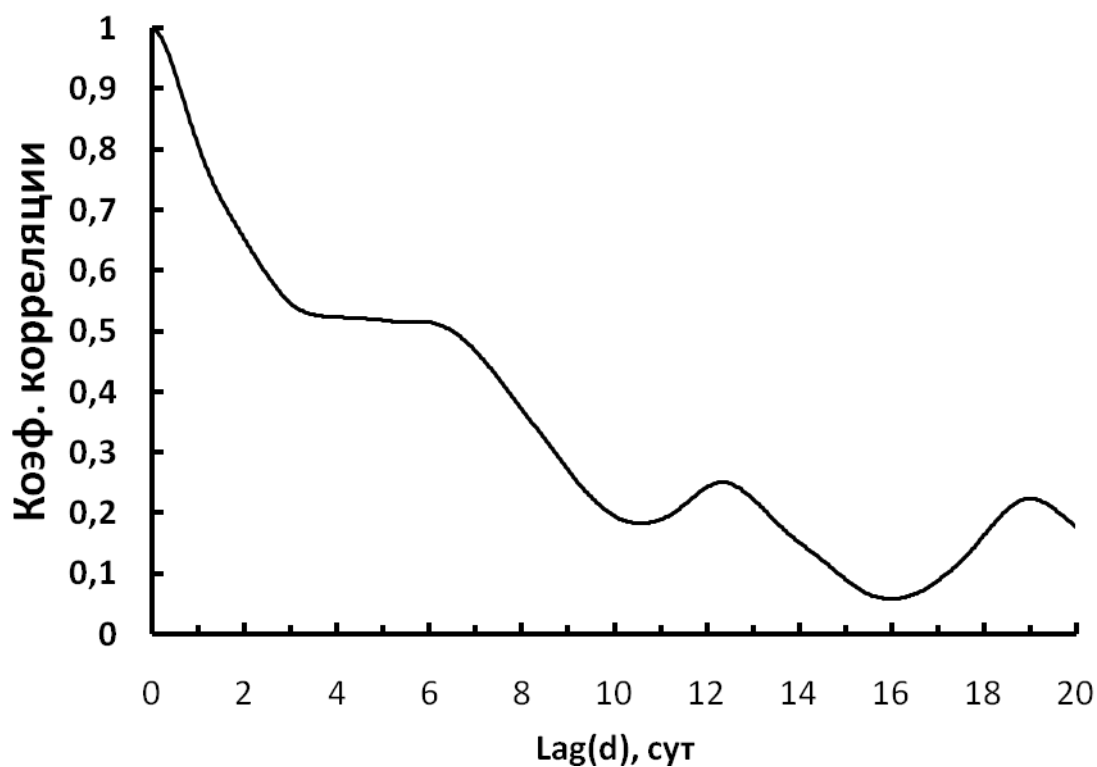


Рисунок 5.8. Коррелограмма для автокорреляционной функции временного ряда измеренных значений атмосферного давления.

Как видно из рисунка 5.4 временная зависимость концентрации радона в помещении проявляет четкую суточную периодичность. Также проявляется период равный 7 дням, соответствующий рабочей неделе. Изменения температур и разности давлений (Рисунок 5.5-5.7) между внутренним объемом здания и наружной атмосферой также демонстрируют ожидаемую суточную периодичность. Для значений атмосферного давления (Рисунок 5.8) вариации незначительны и в пределах выбранного временного отрезка периодичности выявлено не было.

Выявление характерных периодов во временном ряду концентраций радона проводилось на основании спектрального анализа. Спектральный анализ проводился на основе оценки спектральной плотности мощности (СПМ), путем вычисления квадрата модуля преобразования Фурье последовательности данных с использованием статистического усреднения в пакете программного обеспечения STATISTICA (StatSoft).

Полученные периодограммы показаны на рисунках 5.9-5.10. Для всех временных рядов радоновых наблюдений видна четкая суточная периодичность. Для помещений офисного типа может быть выделен пик со средним периодом равным 6,9 суток (166 часов), соответствующий рабочей неделе. В жилых помещениях недельный период выявляется не так явно и составляет в среднем 5,4 суток (130 часов), что объясняется изменением поведения жильцов в пятницу и выходные дни. 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.

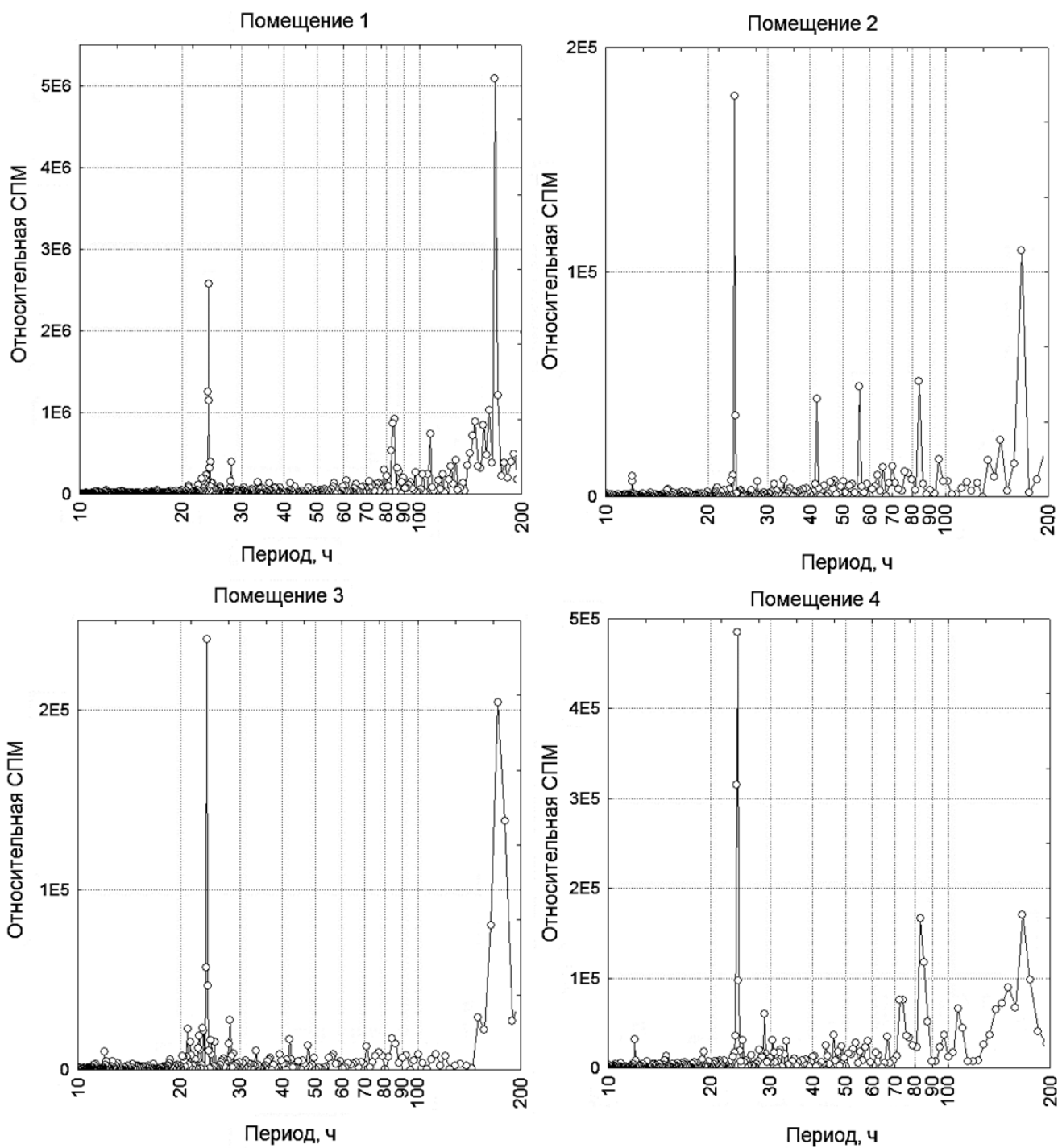


Рисунок 5.9. Периодограмма оценки спектральной плотности мощности для временного ряда радоновых наблюдений для помещений офисного типа.

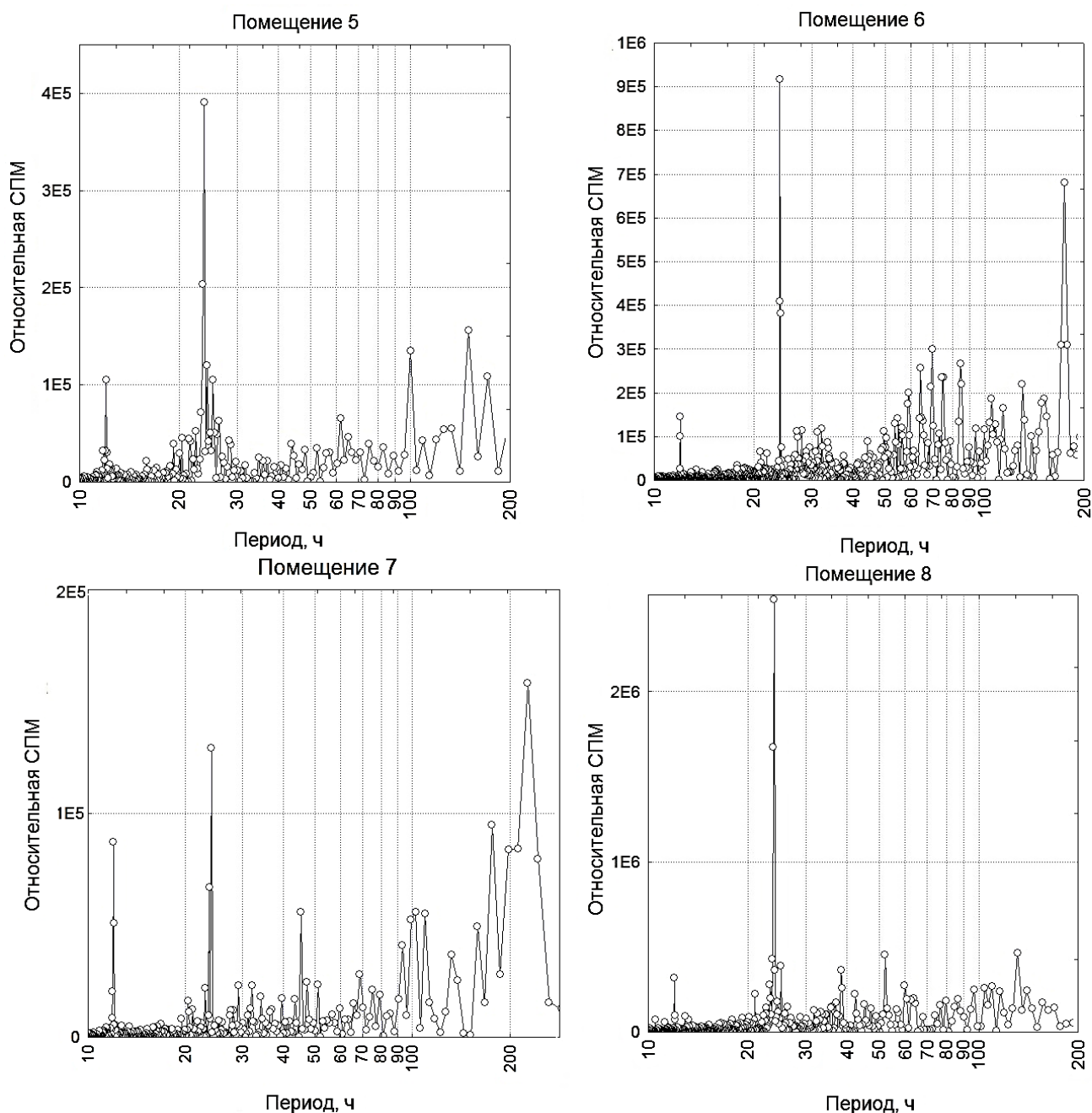


Рисунок 5.10. Периодограмма оценки спектральной плотности мощности для временного ряда радоновых наблюдений для помещений жилого типа.

Анализ, проведенный в помещениях различного назначения, подтверждает предположение о существенном влиянии режима содержания помещения на уровни концентраций радона. Процесс изменения концентрации радона во времени, как правило, описывают для квазистационарных состояний, когда КВО неизменна в течение длительного времени [75,106]. Однако, как было продемонстрировано, в реальных ситуациях процессы имеют более сложный

характер. На практике активная деятельность человека приводит к значительным изменениям в направлениях движения потоков воздуха и КВО в помещении. Определение интенсивности воздухообмена в активном режиме эксплуатации помещения представляет значительный интерес, так как вносит существенный вклад в средние значения КВО.

5.2. Определение параметров воздухообмена в реальных условиях эксплуатации помещений

Использование для определения КВО уравнения (3.13) позволяет оценить значения КВО, соответствующие стационарному режиму содержания помещения. Для определения КВО в активном режиме эксплуатации необходимо использовать выражение (3.17). Поэтому, для апробации способа оценки КВО в активном режиме эксплуатации, были проведены дополнительные специально организованные измерения концентрации радона в помещении 1, для которого практически отсутствует зависимость скорости поступления радона в помещение от ΔT .

Измерения проводились в декабре 2013 года. В ходе данного эксперимента на протяжении двух недель фиксировались моменты и продолжительность проветриваний помещения (проветривания осуществлялись путем открывания окна в помещении на 1,2,3 или 4 часа). После выделения участков, характеризующих переходы помещения из стационарного в активный режим эксплуатации, каждая из кривых изменения концентрации радона задавалась нелинейной регрессионной моделью при помощи уравнения (3.17). Используя нелинейное оценивание методом наименьших квадратов, для уравнения (3.17) были получены численные значения: скорость поступления радона $S_0 = 33 \pm 1 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{ч}^{-1}$, которая соответствует скорости поступления радона, полученной с использованием выражения (3.13) (Таблица 4.2, помещение № 1); КВО в стационарном режиме эксплуатации $\lambda_0 = 0,27 \pm 0,03 \text{ ч}^{-1}$, также

соответствующая КВО, полученной для данного помещения в зимний период (Рисунок 4.15); дополнительная КВО в активном режиме эксплуатации помещения $\lambda = 0,60 \pm 0,15 \text{ ч}^{-1}$. Средняя КВО в активном режиме эксплуатации для данного помещения составила $\lambda_{\text{акт}} = \lambda_0 + \lambda = 0,85 \text{ ч}^{-1}$. Учитывая, что время нахождения помещения в активном режиме эксплуатации было известно, на основании оценок КВО в стационарном и активном режимах эксплуатации, среднее значение $\lambda_{\text{ср}} = 0,53 \pm 0,05 \text{ ч}^{-1}$ было получено усреднением значений КВО с весами, соответствующими времени нахождения помещения в том или ином режиме.

Как было отмечено в разделе 1.3 использование индикаторных газов, таких как N_2O , CO_2 и SF_6 сопряжено с рядом трудностей и ограничений. Основным ограничением является сложность их использования для определения КВО в условиях штатного режима эксплуатации помещений, в особенности для жилых зданий, в которых такие работы потребуют исключение нахождения в помещениях жильцов на весь период измерений. В свою очередь газ радон содержится в атмосфере помещений в силу особенностей конструкции и содержания зданий, что позволяет использовать его в качестве естественного индикаторного газа. Несмотря на то, что применимость способа ограничена только теми зданиями, в помещениях которых средняя концентрация радона превышает 50 Бк/м^3 (данное ограничение вызвано наличием неопределенностей при оценке параметров регрессионной модели), использование разработанной модели в современных зданиях с высокими концентрациями радона, представляет значительный интерес. Применение энергосберегающих технологий строительства в таких зданиях оказывает существенное влияние на параметры воздухообмена, поэтому определение уровней КВО помещений в реальных условиях эксплуатации для таких зданий имеет высокую важность.

Для установления средних уровней КВО были произведены дополнительные расчеты для помещений современных зданий 6-10 (Таблица 4.1). Средние значения КВО были получены на основании оценок КВО

в активном и стационарном режимах эксплуатации. Для регрессионного анализа использовались ранее полученные для помещений 6-10 (Таблица 3.2) значения суммарной скорости поступления радона S_0 и стационарной КВО λ_0 .

Зависимости КВО от разности температуры между внутренней и наружной атмосферой ΔT для помещений современных зданий показаны на рисунках 5.11-5.15 с указанием стандартных отклонений значений. Нижний и верхний графики на рисунках представляют зависимости КВО от ΔT для стационарного λ_0 и активного $\lambda_{\text{акт}}$ режимов эксплуатации помещений соответственно. График, проходящий между ними, соответствует зависимости средней КВО $\lambda_{\text{ср}}$ от ΔT , которая была получена усреднением значений КВО для различных режимов эксплуатации помещения с весами соответствующими времени нахождения помещения в том или ином режиме.

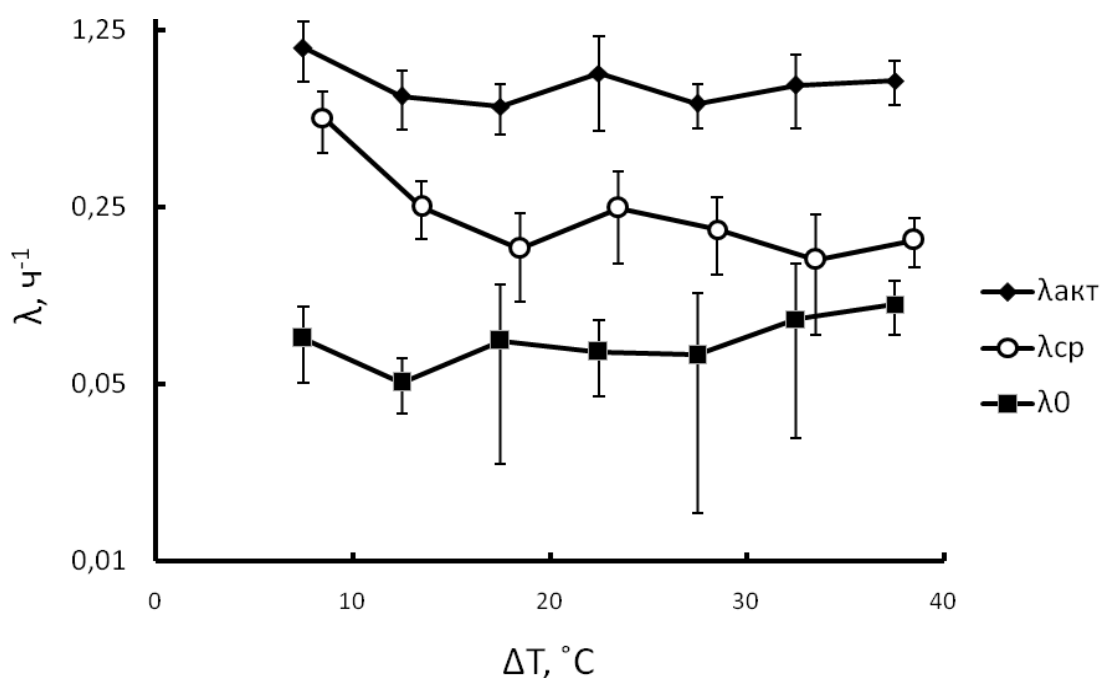


Рисунок 5.11. Зависимость КВО от ΔT для активного $\lambda_{\text{акт}}$ и стационарного λ_0 режима эксплуатации помещения (Помещение б).

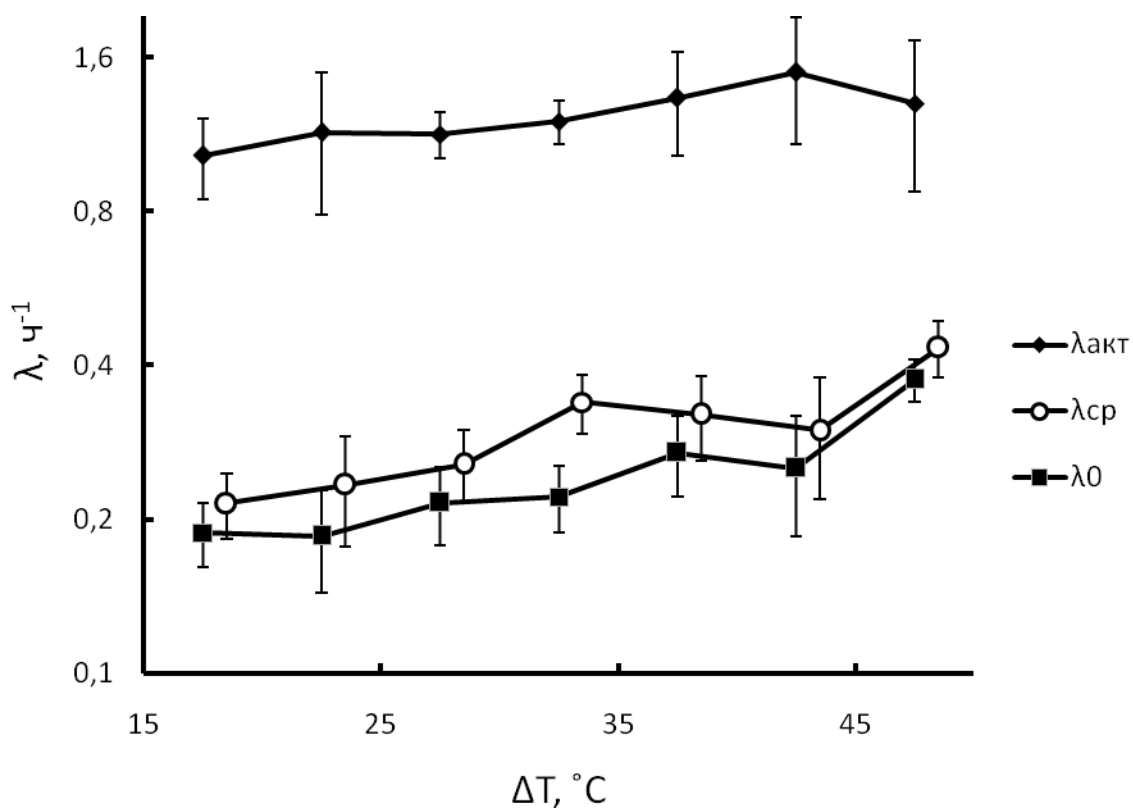


Рисунок 5.12. Зависимость КВО от ΔT для активного $\lambda_{\text{акт}}$ и стационарного λ_0 режима эксплуатации помещения (Помещение 7).

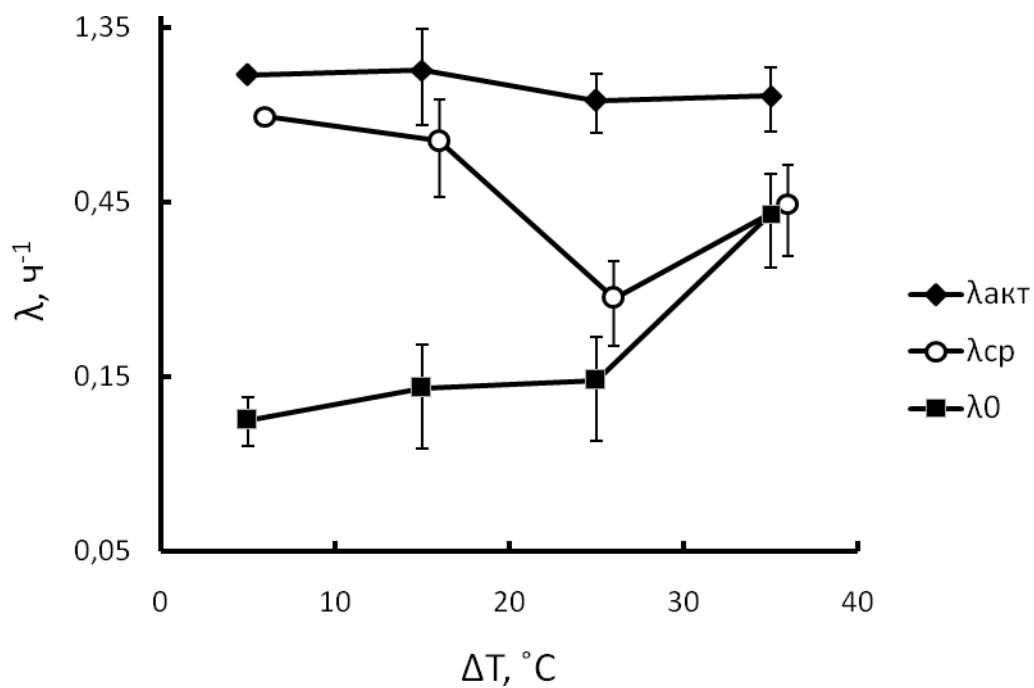


Рисунок 5.13. Зависимость КВО от ΔT для активного $\lambda_{\text{акт}}$ и стационарного λ_0 режима эксплуатации помещения (Помещение 8).

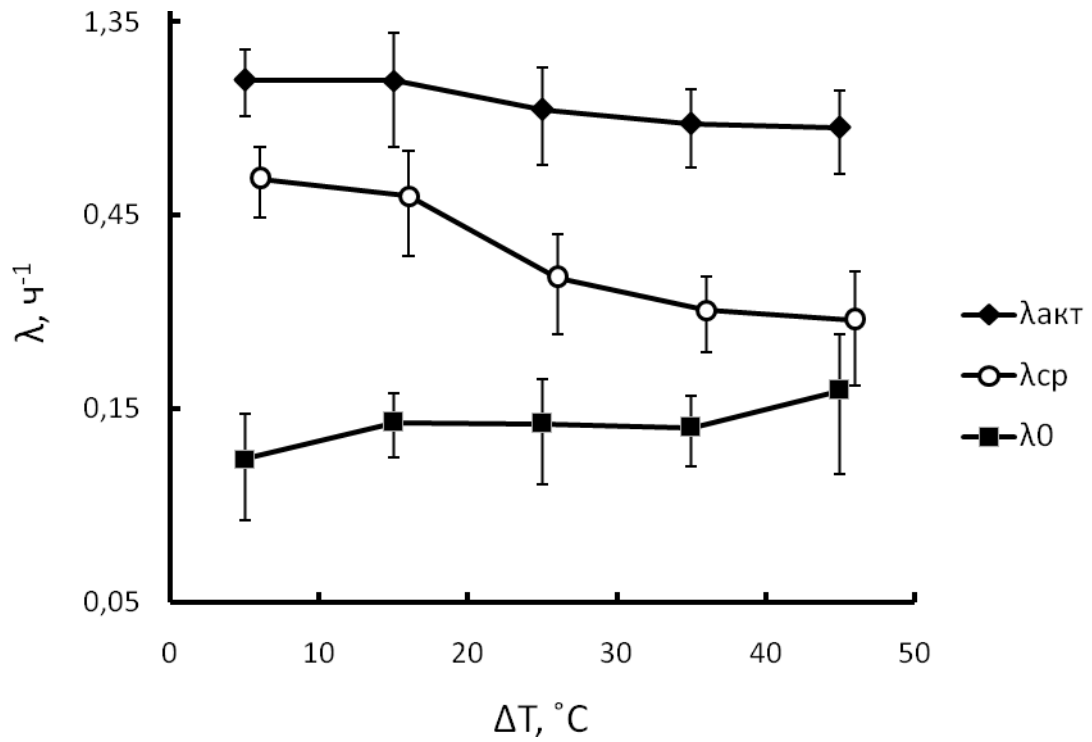


Рисунок 5.14. Зависимость КВО от ΔT для активного $\lambda_{\text{акт}}$ и стационарного λ_0 режима эксплуатации помещения (Помещение 9).

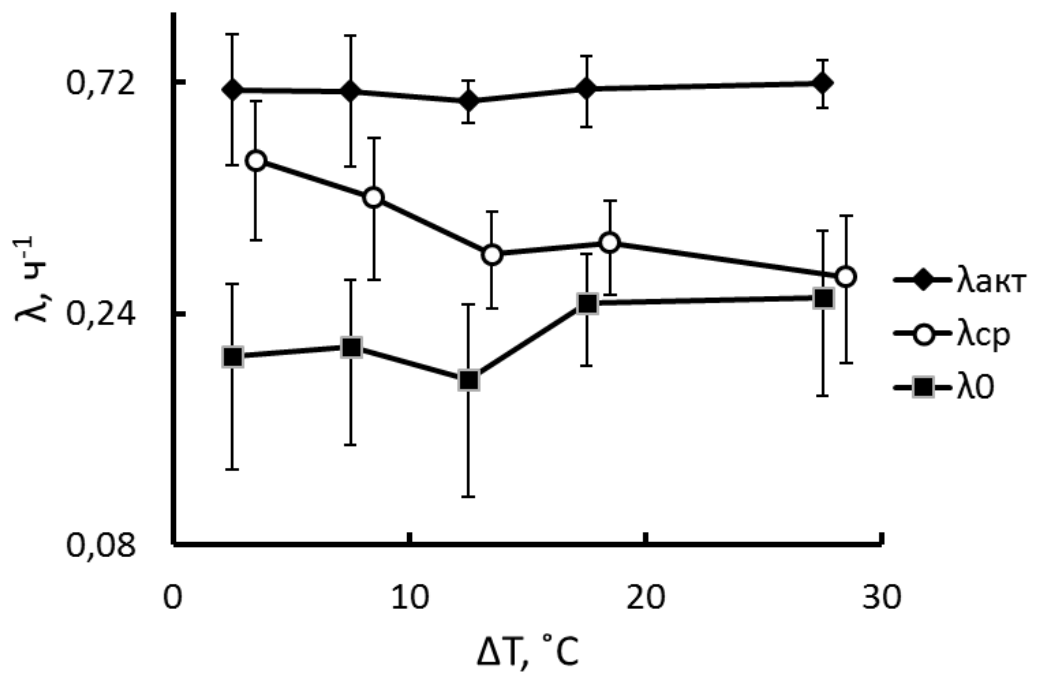


Рисунок 5.15. Зависимость КВО от ΔT для активного $\lambda_{\text{акт}}$ и стационарного λ_0 режима эксплуатации помещения (Помещение 10).

Как можно видеть из рисунков 5.11-5.15 и таблицы 4.1, такие факторы как постоянное пребывание людей в жилом помещении и постоянное проветривание могут приводить к различному характеру изменения средней КВО помещений. Так в помещении 6, несмотря на высокие уровни КВО в активном режиме эксплуатации, кривая изменения средней КВО от ΔT практически соответствует кривой изменения КВО в стационарном режиме. В остальных помещениях характер изменения средней КВО свидетельствует о хорошем проветривании помещений в теплый период года и практически полном закупоривании помещений зимой. Такой характер изменения воздухообмена в помещениях квартир отмечен в ряде работ [30,93].

Полученные параметры воздухообмена в обследованных помещениях современных зданий приведены в Таблице 5.1.

Таблица 5.1.

Параметры воздухообмена в обследованных помещениях.

№	$\lambda_0 \pm \text{станд.ош.},$ ч^{-1}	$\lambda_{\text{акт}} \pm \text{станд.ош.},$ ч^{-1}	$\lambda_{\text{ср}} \pm \text{станд.ош.},$ 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 $0,2 \text{ ч}^{-1}$, при этом КВО в активном режиме эксплуатации достигает величин $\sim 1,5 \text{ ч}^{-1}$ со средним по всей выборке $0,87 \text{ ч}^{-1}$. Полученные значения $\lambda_{\text{ср}}$ для обследованных помещений хорошо согласуются с оценками, полученными в работе [11] при

помощи моделирования воздухообмена в помещениях на основании воздухопроницаемости ограждающих конструкций.

5.3. Исследование влияния различных параметров на концентрации радона в модельных помещениях

Для моделирования влияния режима содержания помещения и характеристик строительных конструкций на уровни концентраций радона были проведены полносезонные измерения в отдельном двухэтажном здании. Здание было ранее специально построено предприятием ПСО «Теплит» для изучения влияния метеорологических и других параметров на характеристики энергосбережения зданий, возводимых с преимущественным использованием газозолобетона. Помещение А, в указанном двухэтажном здании, соответствует помещению 4, Таблица 4.1.

Для соотнесения полученных результатов аналогичный анализ был проведен для Помещения Б в квартире многоэтажного жилого дома (соответствует помещению 7, Таблица 4.1). В Помещении Б был получен близкий к 100% вклад диффузионного поступления радона, при этом здание было построено с использованием типовых строительных материалов (Таблица 2.1). Скорость поступления радона, обусловленная диффузионным механизмом, и КВО для Помещения Б в целом соответствует средним значениям, полученным в выборке обследованных жилых помещений современных зданий (Таблица 4.2). Внешний вид зданий для моделирования Помещений А и Б представлен на рисунке 5.16.



Рисунок 5.16. Здания для моделирования Помещений А (слева) и Б (справа).

Выбранные помещения имеют различия в использованных строительных материалах: первое помещение (Помещение А) возведено преимущественно из газозолобетонных блоков, второе помещение (Помещение Б) имеет стены и заливку плит перекрытия из монолитного бетона, за исключением внешней ограждающей теплоизоляционной стены из газозолобетона.

Для проверки того, что наблюдаемые при натуральных измерениях средние значения концентрации радона могут быть полностью обусловлены диффузионным переносом радона из материалов строительных конструкций, было выполнено расчет диффузионного поступления радона в помещениях. При диффузионном механизме переноса выделение (эксхалляция) радона из строительных материалов с удельной активностью радия-226 C_{Ra} описывается выражением (3.4). Если исключить вклад конвективного поступления, концентрация радона в атмосфере помещений зависит от следующих параметров [107]:

- скорости поступления радона из строительных материалов;
- отношения площади стен, пола и потолка помещения, S_i , к его объему, V ;
- кратности воздухообмена λ_v .

Расчет и моделирование проводилось на основании оцененных ранее параметров КВО и скорости поступления радона. Используемые для моделирования характеристики приведены в Таблице 5.2.

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

На основании расчетов были получены уровни концентраций радона помещениях $A_{1расч}=60$ Бк/м³ и $A_{2расч}=130$ Бк/м³. Для Помещения Б расчетное значение хорошо соответствует экспериментально полученному значению в 143 Бк/м³. Расчет согласуется с предположением о доминирующем диффузионном пути поступления радона в помещение за счет его выделения из строительных материалов. В свою очередь в Помещении А, наблюдаемые различия в расчетных и экспериментальных значениях могут быть обусловлены дополнительным конвективным поступлением радона из неэксплуатируемого складского помещения на 1 этаже здания. На это указывает более низкий процентный вклад диффузионного потока (Таблица 4.2).

Результаты расчетов проверялись при помощи программного пакета RESRAD-Building [108], предназначенного для оценки доз облучения людей, находящихся в зданиях и помещениях, содержащих различные источники ионизирующего излучения. При расчете облучения человека за счет поступления

радона в помещении была использована схема расположения источников, представленная на рисунке 5.17.

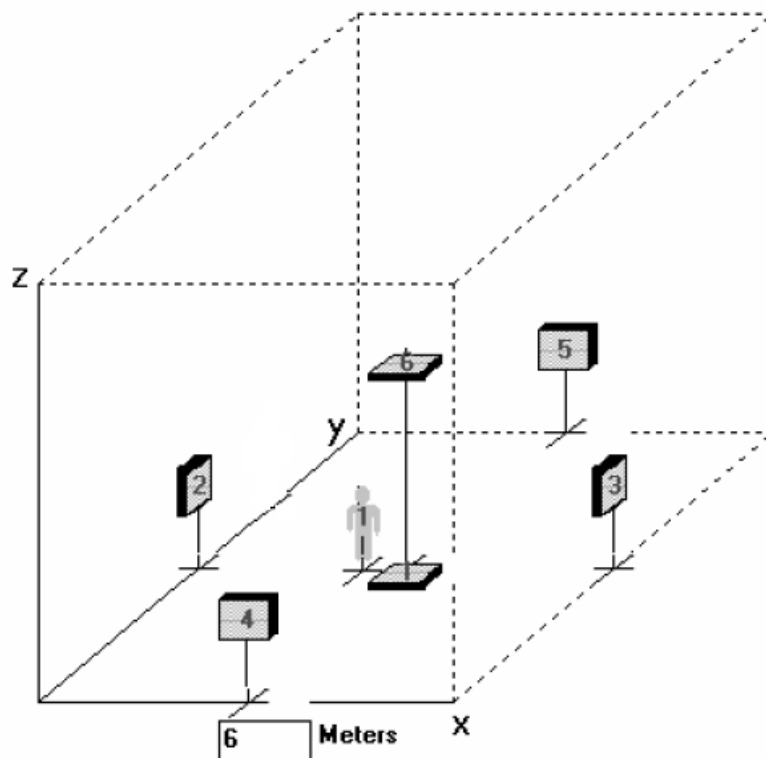


Рисунок 5.17. Схема расположения источников при моделировании облучения человека дочерними продуктами распада радона.

Здесь источник 1 – плита перекрытия пола; источники 2 – 6 стены помещения и плита перекрытия потолка. Для помещения Б одна из стен являлась внешней, выполненной из газозолобетона, поэтому характеристики материала этой стены были заданы отдельно. Для задания радиационных характеристик источников были использованы оценки, полученные в разделе 2.1.

После проведения расчетов при помощи программного пакета RESRAD-Building было проведено моделирование влияния режима содержания помещения и характеристик строительных материалов на концентрации радона. В процессе моделирования варьировались такие параметры как коэффициент диффузии радона в строительных конструкциях (в диапазоне $1 \cdot 10^{-8} \div 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$), коэффициент эманирования ($0,16 \div 0,28$), пористость ($0,05 \div 0,75$) и КВО ($0,1 \div 0,8 \text{ ч}^{-1}$).

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 5.18 приведена зависимость ЭРОА радона от КВО с учетом изменчивости остальных параметров в указанных диапазонах.

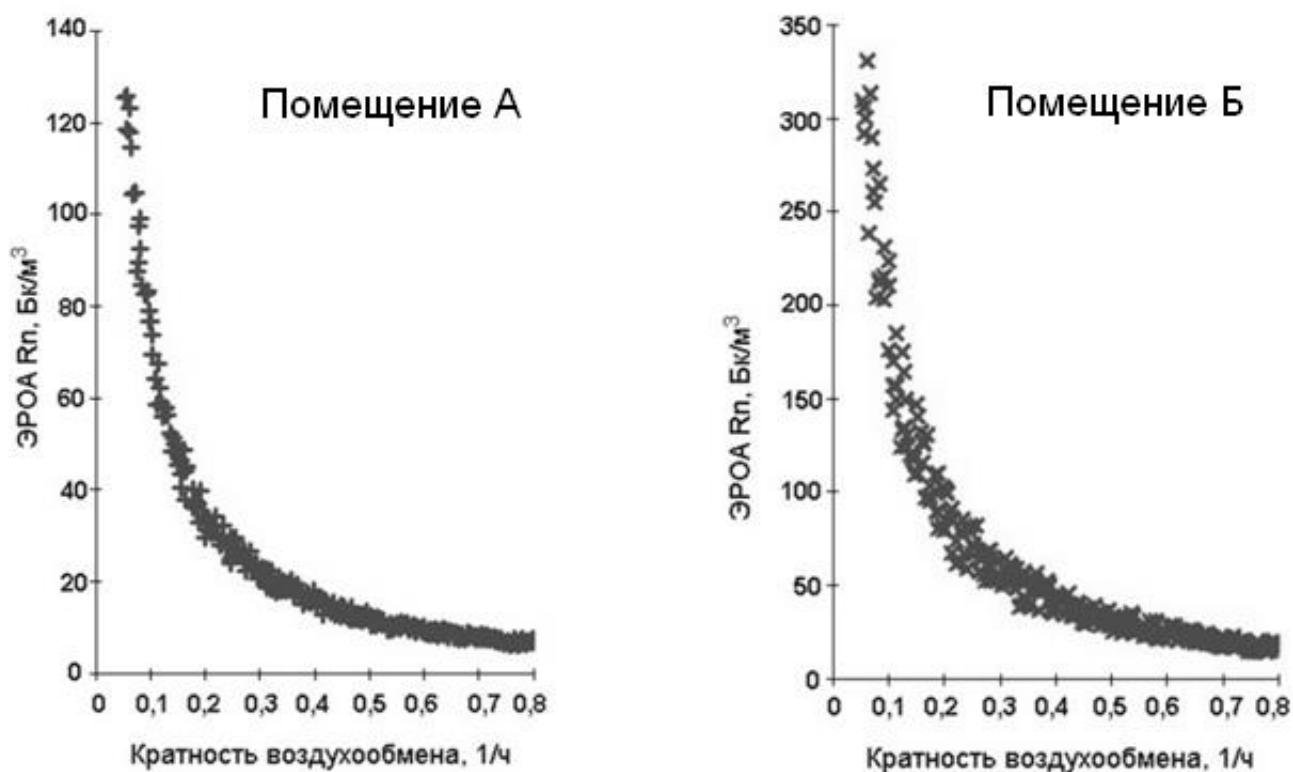


Рисунок 5.18. Зависимость ЭРОА радона от КВО с учетом изменчивости характеристик строительных материалов.

Таким образом, даже при соблюдении требований к УА строительных материалов, концентрации радона в помещениях могут быть высокими и в ряде случаев превышать санитарные нормативы.

5.4. Анализ полученных результатов

Согласно результатам моделирования (Рисунок 5.18), 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 50-60 Бк/кг), наблюдается превышение нормативного уровня ЭРОА радона 100 Бк/м^3 для проектируемых новых зданий жилищного и общественного назначения [2].

Результаты исследования указывают на необходимость дополнительного нормирования УА строительных материалов по радю-226. Норматив в $A_{\text{эфф}}=370 \text{ Бк/кг}$ не обеспечивает допустимых уровней концентрации радона в помещениях современных зданий. Так, например, в работе [109] предлагается с целью охраны здоровья граждан ввести величину максимальной активности радия-226 при проверке строительных материалов на наличие природных радионуклидов на уровне 120 Бк/кг . Согласно проведенному моделированию УА радия-226 строительных материалов в условиях применения энергосберегающих технологий строительства не должна превышать величину порядка 100 Бк/кг .

Снижение УА радия-226 в строительных материалах может рассматриваться как превентивная мера снижения уровней концентрации радона для проектируемых зданий. Причем, учитывая, что основным источником поступления радона являются ограждающие конструкции здания, снижение УА радия-226 приведет к снижению не только диффузионной составляющей поступления радона, но и конвективной, обусловленной переносом радона из помещений нижних этажей.

В работах [110,111] предлагается вовсе отказаться от классификации строительных материалов по УА радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K . Вместо этого предложено классифицировать строительные материалы на основе величины плотности потока радона, измеряемой одновременно в одинаковых условиях. Этот способ является предпочтительным, поскольку автоматически учитываются такие характеристики, как плотность, пористость материала и размер гранул.

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. Согласно полученным результатам, для помещений современных зданий, КВО, в условиях реальной эксплуатации, находится на достаточно низком уровне $\sim 0,35 \text{ ч}^{-1}$.

Значимость обеспечения требуемого воздухообмена подтверждается экспериментальными оценками [112], из которых вытекает, что в квартире с жилой площадью 100 м^2 при проживании в ней двух человек требуется кратность воздухообмена $0,35 \text{ ч}^{-1}$, четырех человек - $0,55 \text{ ч}^{-1}$, пяти человек - $1,0 \text{ ч}^{-1}$. Причем эти КВО являются заниженными, так как не учитывают требуемый воздухообмен для удаления с приточным воздухом поступивших загрязняющих веществ и вредные выделения в помещениях. Так, например, по санитарно-гигиеническим нормам Московской области КВО должна составлять от $0,5$ до 1 ч^{-1} [113].

При естественной вентиляции окна играют роль приточных устройств и при недостаточной инфильтрации вентиляция должна осуществляться через открытые форточки. Однако невозможность отрегулировать положение створок вынуждает жильцов использовать их только для кратковременного проветривания помещений даже при ощутимой духоте в квартире [30,114]. Учитывая, что для существующих многоэтажных городских жилищ в условиях доминирующего диффузионного механизма поступления радона единственным эффективным мероприятием по снижению повышенных концентраций радона является изменение режима вентиляции помещений, необходим пересмотр используемых методов обеспечения воздушного режима [115-118].

Для тех помещений, где требуется снижение концентрации радона до приемлемых уровней, необходимый поток воздуха может быть рассчитан с применением разработанного способа оценки параметров воздухообмена. Его использование позволяет уйти от использования трудоемких и неточных (в реальных условиях эксплуатации) способов оценки КВО при помощи экспериментов с аэродверью и индикаторными газами.

Выводы

На основании выполненных экспериментальных исследований установлено:

1. Процесс изменения концентрации радона во времени в реально эксплуатируемых помещениях не может быть описан с позиции квазистационарных состояний.
2. Анализ достаточно длительных временных рядов измерений концентрации радона, а также разности температур между внутренним объемом помещения и наружной атмосферой позволяет оценить не только параметры поступления радона, но и характеристики воздухообмена в помещении.
3. Удельная активность радия-226 в строительных материалах не является основным фактором, определяющим высокие концентрации радона в помещениях современных зданий.
4. Высокие концентрации радона в помещениях современных зданий вызваны низкой КВО, обусловленной применением энергосберегающих технологий и отсутствием организованного притока наружного воздуха при эксплуатации помещений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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 $A_{эфф}=370$ 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. О радиационной безопасности населения: федер. закон Рос. Федерации от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 5 декабря 1995 г. // Рос. газ. – 1996 – 17 января.
2. СанПиН 2.6.1.2523 - 09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) М.: Минздрав России, 2009.
3. Об энергосбережении: федер. закон Рос. Федерации от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 13 марта 1996 г. // Рос. газ. – 1996 – 10 апреля.
4. Ярмошенко И.В., Онищенко А.Д., Жуковский, М.В. Обследование уровней накопления радона в жилых зданиях города Екатеринбурга // Вопросы радиационной безопасности. 2010 . № 3(59). С. 62-69.
5. Janssen M. Modeling ventilation and radon in new Dutch dwellings // Indoor Air. 2003. № 13. P. 118-127.
6. Lugg A., Probert D. Indoor radon gas: a potential health hazard resulting from implementing energy-efficiency measures // Appl Energy. 1997. № 56. P. 93-196.
7. Wilkinson P., Smith K., Davies M., Adair H., Armstrong B., et al. Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: household energy // Lancet. 2009. № 374. P. 1917-1929.
8. Briggs D., Denman A., Gulliver J., Marley R., et al. Time activity modelling of domestic exposures to radon // J Environ Manage. 2003. № 67. P. 107-120.
9. Hunter N., Muirhead C.R., Miles J.C., Appleton J.D. Uncertainties in radon related to house-specific factors and proximity to geological boundaries in England // Radiat Prot Dosimetry. 2009. № 136. P. 17-22.

10. Nero A., Boegel M., Hollowell C., Ingersoll J., Nazaroff W., Revzan K. Radon and its daughters in energy-efficient buildings / Berkeley CA: Lawrence Berkeley National Laboratory. 1980.
11. Milner J., Shrubsole C., Das P., Jones B., et al. Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study // *BMJ*. 2014. № 348. P. 1-12.
12. Andrew L., Douglas P. Indoor Radon Gas: A Potential Health Hazard Resulting from Implementing Energy-Efficiency Measures // *Applied Energy*. 1997. № 56(2). P. 93-196.
13. Гулабянц Л. А. Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий. – М.: НО «ФЭН-НАУКА», 2013. 52 с.
14. Жуковский М.В., Кружалов А.В., Гурвич В.Б., Ярмошенко И.В.. Радоновая безопасность зданий. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 180 с.
15. Hultqvist B. Studies on naturally occurring ionising radiations // *K. Svenska Vetensk. Akad. Handl.* 1956. № 6(3).
16. Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации. Доклад НКДАР ООН за 1988 г. М.: Мир, 1992. Т.1.
17. Henschel D.B. Radon Reduction Techniques for Detached Houses. Technical Guidance (Second Edition) / US Environmental Protection Agency. 1988. EPA/625/5-87/019.
18. Righi S., Bruzzi L. Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings // *J Environ Radioact.* 2006. № 88(2). P. 158-170.
19. Bossew P. The radon emanation power of building materials, soils and rocks. // *Appl Radiat Isot.* 2003. № 59. P. 389-392.
20. Stoulos S., Manolopoulou M., Papastefanou C. Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece // *J Environ Radioact.* 2003. № 69. P. 225-240.

21. Sakoda A., Ishimori Y., Yamaoka K. A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash // *Appl Radiat Isot.* 2011. № 69. P. 1422-1435.
22. Спиридонов А. В. А зачем экономить энергию? // *Оконная и Фасадная Практика.* 2008. № 2. С. 38-41.
23. Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C. A review on buildings energy consumption information // *Energy and Buildings.* 2008. № 40(3). P. 394-398.
24. Russian Federation: Balances of 2011 / International Energy Agency, 2011. URL: <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?&country=RUSSIA&year=2011&product=Balances>.
25. Шубин И. Л., Спиридонов А. В. Проблемы энергосбережения в российской строительной отрасли // *Энергосбережение.* 2013. №1. С. 15-21.
26. Об утверждении требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений: Приказ Министерства регионального развития РФ № 224 от 17 мая 2011 г. // *АВОК.* 2011. URL: <http://www.abok.ru/pages.php?block=prik224>.
27. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Стройиздат, 1973. 284 с.
28. СНиП 11-3-79. Строительная теплотехника. М.: Госстрой России, 1995. 28 с.
29. Ю. А. Табунщиков. Новый век ОВК: проблемы и перспективы // *АВОК.* 2000. № 3. С. 10-13.
30. Китайцева Е.Х., Малявина Е.Г. Естественная вентиляция жилых зданий // *АВОК.* 1999. № 3. С. 35-43.
31. Жуковский М.В., Донцов Г.И., Шориков А.О., Рогатко А.А., Модификация метода накопительной камеры для измерения

- плотности потока радона с поверхности почвы // АНРИ. 1999. № 3. С. 9-20.
32. Keller G., Hoffmann B., Feigenspan, T. Radon permeability and radon exhalation of building materials // *Sci of Total Environ.* 2001. № 272. P. 85-89.
 33. Chen J., Rahman N.M., Atiya I.A. Radon exhalation from building materials for decorative use // *J Environ Radioact.* 2010. № 101(4). P. 317-322.
 34. Hassan N.M., Ishikawa T., Hosoda M., Iwaoka K., Sorimachi A., Sahoo S.K., et al. The effect of water content on the radon emanation coefficient for some building materials used in Japan // *Radiat Meas.* 2010. doi:10.1016/j.radmeas.2010.11.006.
 35. Maged A.F., Ashraf F.A. Radon exhalation rate of some building materials used in Egypt // *Environ Geochem Health.* 2005. № 27(5–6). P. 485-489.
 36. Mahur A.K., Kumar R., Mishra M., Sengupta D., Prasad R. An investigation of radon exhalation rate and estimation of radiation doses in coal and fly ash samples // *Appl Radiat Isot.* 2008. № 66(3). P. 401-406.
 37. Petropoulos N.P., Anagnostakis M. J., Simopoulos S. E. Building materials radon exhalation rate: ERRICCA intercomparison exercise results // *Sci Total Environ.* 2001. № 272(1–3). P. 109-118.
 38. Rahman S., Mati N., Matiullah, Ghauri B. Radon exhalation rate from the soil, sand and brick samples collected from NWFP and FATA, Pakistan // *Radiat Prot Dosimetry.* 2007. № 124(4). P. 392-399.
 39. Kumar A., Chauhan R.P., Joshi M., Sahoo B.K., Modeling of indoor radon concentration from radon exhalation rates of building materials and validation through measurements // *J Environ Radioact.* 2013. № 127, P. 50-55.

40. Fronka A. Indoor and soil gas radon simultaneous measurements for the purpose of detail analysis of radon entry pathways into houses // Radiat Prot Dosim. 2011. № 145(2-3). P. 117-122.
41. Blomsterberg A. Air Leakage in Dwellings. Dept. Bldg. Constr., Report No. 15 / Stockholm: Swedish Royal Institute of Technology, 1977.
42. Sherman M.H. The Use of Blower-Door Data // Indoor Air. 1995. № 5. P. 215-224.
43. ГОСТ Р 54857-2011. Здания и сооружения. Определение кратности воздухообмена помещений методом индикаторного газа. М.: Стандартинформ, 2012.
44. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: федер. закон Рос. Федерации от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 4 января 2010 г. // Рос. газ. – 2009 – 31 декабря.
45. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. М.: Госстрой России, 2004. 26 с.
46. ГОСТ Р 51380-99. Энергосбережение. Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции их нормативным значениям. М.: Стандартинформ, 2000.
47. ГОСТ 51387-99. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. М.: Стандартинформ, 2000.
48. Kronvall J. Air Tightness Measurements and Measurement Methods. Stockholm: Swedish Council for Building Research, 1980. V. D8.
49. Brabec M., Jilék K. State-space dynamic model for estimation of radon entry rate, based on Kalmanfiltering // J Environ Radioact. 2007. № 98. P. 285-297.

50. Kittas C., Boulard T., Mermier M., Papadakis G. Wind-induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings // *J Agric Res.* 1996. № 65(1). P. 37-49.
51. Snell H., Seipelt F., van den Weghe H. Ventilation rates and gaseous emissions from naturally ventilated dairy houses // *Biosyst.* 2003. № 86(1). P. 67-73.
52. Samer M., Müller H-J., Fiedler M., Ammon C., Gläser M., Berg W., et al. Developing the ⁸⁵Kr tracer gas technique for air exchange rate measurements in naturally ventilated animal buildings // *Biosyst.* 2011. № 109(4). P. 276-287.
53. Цапалов А.А., Кувшинников С.И. Зависимость объемной активности радона в помещениях от разности внутренней и наружной температур воздуха // *АНРИ.* 2008. № 2. С. 37-43.
54. Цапалов А.А. Оценка среднегодового уровня ЭРОА радона в помещениях на основе результатов краткосрочных измерений радиометром АльфаАЭРО // *АНРИ.* 2008. № 3. С. 49-58.
55. Yarmoshenko I., Onishchenko A., Zhukovsky M. Establishing a regional reference indoor radon level on the basis of radon survey data // *J Radiol Prot.* 2013. № 33. P. 329-338.
56. Ярмошенко И.В. Закономерности облучения населения изотопами радона на примере свердловской области / Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Екатеринбург: УрО РАН. 1999. 130 с.
57. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В., Кирдин И.А. и др. Радон в жилых помещениях Среднего Урала: медицинские последствия его воздействия // *Мед. радиология и радиац. безопасность.* 2003. Т. 48. № 2. С. 5-17.
58. Васильев А.В., Жуковский М.В., Онищенко А.Д., Вишневский А.А. Строительные материалы как источник радона в зданиях,

- построенных по современным технологиям // Строительные материалы. 2013. № 4. С. 104-109.
59. Papaefthmiou H., Gouseti O. Natural radioactivity and associated radiation hazards in building materials used in Peloponnese, Greece // Radiat Meas. 2008. № 43. P. 1453-1457.
 60. Damla N., Cevik U., Kobya A.I., et al. Assessment of natural radioactivity and mass attenuation coefficients of brick and roofing tile used in Turkey // Radiat Meas. 2011. № 46. P. 701-708.
 61. Kovler K., Haquin G., Manasherov V., et al. Natural radionuclides in building materials available in Israel // Build Environ. 2002. № 37. P. 531-537.
 62. Kovler K. Radiological constraints of using building materials and industrial by-products in construction // Constr Build Mater. 2009. № 23. P. 246-253.
 63. Keller G., Hoffmann B., Feigenspan, T. Radon permeability and radon exhalation of building materials // Sci of Total Environ. 2001. № 272. P. 85-89.
 64. Serena R., Luigi B. Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings // J Environ Rad. 2006. № 88. P. 158-170.
 65. Taylor-Lange S.C., Stewart J.G., Juenger M.C.G., Siegel, J.A. The contribution of fly ash toward indoor radon pollution from concrete // Build Environ. 2012. № 56. P. 276-282.
 66. Taylor-Lange S., Juenger M.C.G., Siegel, J.A. Radon emanation fractions from concretes containing fly ash and metakaolin. Sci of the Total Environ. 2014. № 1 (466-467). P. 1060-1065.
 67. Durrani S.A., Bull R.K. Solid State Nuclear Track Detection. Oxford and New York: Pergamon Press, Ltd., 1987. Vol. III. 275 P.

68. Николаев В.А. Трековый метод в радоновых измерениях // АНРИ. 1998. № 2(13). С. 16-27.
69. Николаев В.А. Твердотельные трековые детекторы в радиационных исследованиях. С-Пб.: Изд-во Политехнического Университета, 2012. 283 с.
70. Жуковский М.В., Новиков Д.В. Модифицированный метод измерения удельной активности Ra-226 в образцах грунта // АНРИ. 2011. № 2. С. 25-30.
71. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В. Радон: измерение, дозы, оценка риска. – Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 231 с.
72. Жуковский М.В., Васильев А.В. Определение механизмов и параметров поступления радона в помещение // АНРИ. 2012. № 1. С. 5-14.
73. Vasilyev A.V., Zhukovsky M.V. Determination of mechanisms and parameters which affect radon entry into a room // J Environ Radioact. 2013. № 124. P. 185-190.
74. Dainius J., Aloyzas G. Hourly measurement method for radon progeny volumetric activity in air // J Environ Engineering and Landscape Management. 2007. № 15(3), P. 158-165.
75. Hobbs W. Ventilation level from time profile of radon / Proceedings of the AARST 1999 International Radon Symposium, Las Vegas, NV: 1999.
76. Gadgil A.J. Models of radon entry // Radiat Prot Dosimetry. 1992. № 45. P. 373-379.
77. Fisk W.J., Modera M.P., Sextro R.G., Garbesi K., Wollenberg H.A., et al. Radon entry into basements: approach, experimental structures, and instrumentation of the small structures research project / Berkeley CA: Lawrence Berkeley National Laboratory. 1992. LBL-31864.

78. Sherman M.H. Simplified Modeling for Infiltration and Radon Entry / In: Proceedings, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings Conference V(addendum), Atlanta, GA: ASHRAE. 1992.
79. Capra D., Silibello C., Queirazza G. Influence of ventilation rate on indoor radon concentration in a test chamber // Radiat Prot Dosimetry. 1994. № 56. P. 15-18.
80. Andersen C.E. Numerical modelling of radon-222 entry into houses: an outline of techniques and results / In: Proceedings, Radon in the Living Environment, Athens, Greece; 1999. P. 19-23.
81. Man C.K., Yeung H.S. Modelling and measuring the indoor radon concentrations in highrise buildings in Hong Kong // Appl Radiat Isot. 1999. № 50. P. 1131-1135.
82. Font L., Baixeras C. The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors // Sci Total Environ. 2003. № 307. P. 55-69.
83. Jelle B.P. Development of a model for radon concentration in indoor air // Sci Total Environ. 2012. № 416. P. 343-350.
84. Andersen, C.E. ERICCA Radon Model Intercomparison Exercise / Denmark : Riso National Lab, Riso-R-1120. 1999.
85. Robinson A.L. Radon Entry into Buildings: Effects of Atmosphere Pressure Fluctuations and Building Structural Factors / Berkeley CA: Lawrence Berkeley National Laboratory. 1996. LBL-34843. Ph. D. Thesis.
86. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 120 с.
87. Arvela H. Residential Radon in Finland: Seasonal variation in radon concentrations of 3000 dwellings with model comparison // Radiat Prot Dosim. 1995. № 59(1). P. 33-42.

88. Sherman M.H, Modera M.P. Comparison of measured and predicted infiltration using the LBL infiltration model / Berkeley CA: Lawrence Berkeley National Laboratory. 1984. LBL-17001.
89. Васильев А.В., Жуковский М.В., Онищенко А.Д., Вишневецкий А.А. Исследование механизмов и источников поступления радона в здания, построенные по современным технологиям // Стройкомплекс Среднего Урала. 2012. № 12. С. 21-24.
90. Расписание погоды в России и в мире. Мет. Офис. Великобритания. URL: www.rp5.ru.
91. Sherman M.H, Modera M.P. Comparison of measured and predicted infiltration using the LBL infiltration model / Berkeley CA: Lawrence Berkeley National Laboratory. 1984. LBL-17001.
92. Малявина Е. Г., Бирюков С. В., Дианов С. Н. Учет влияния воздушного режима на работу системы вентиляции жилых зданий // АВОК. 2003. № 6. С. 14-26.
93. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В. Опыт реконструкции многоквартирного жилого дома в Копенгагене // АВОК. 2002. № 5. С. 26-35.
94. Цапалов А.А. Закономерности поведения радоновой радиоактивности в помещениях зданий и принцип контроля // Научно-технический журнал Вестник МГСУ. 2011. № 3, Т. 2. С. 15-23.
95. Seftelis I., Nicolaou G., Trassanidis S., Tsagas F.N., et al. Diurnal variation of radon progeny // J Environ Radioact. 2007. № 97. P. 116-123.
96. Zunic Z.S., Yarmoshenko I.V., Kelleher K., Paridaens J., et al. Comparison of retrospective and contemporary indoor radon measurements in a high-radon area of Serbia // Sci Total Environ. 2007. № 387(1-3). P. 269-275.
97. Miles J.C.H. Temporal variation of radon levels in houses and implications for radon measurement strategies // Radiat Prot Dosim. 2001. № 93. P. 369-375.

98. Eaton R.S., Scott A.G. Understanding radon transport into houses // Radiat Prot Dosim. 1984. № 7. P. 251-253.
99. Denman A.R., Crockett R.G., Groves-Kirkby C.J., Phillips P.S., et al. The value of seasonal correction factors in assessing the health risk from domestic radon – a case study in Northamptonshire, UK // Environ Int. 2007. № 33. P. 34-44.
100. Papp G., Marx G., Szalai S., Toth E. Year by year changes of indoor radon levels // J Radioanal Nuc. Chem. 2001. № 250. P. 541-545.
101. Tsang Y.W., Narasimhan T.N. Effects of periodic atmospheric pressure variation on radon entry into buildings // J Geophys Res. 1992. № 97. P. 9161-9170.
102. Porstendorfer J., Butterweck G., Reineking A. Daily variation of the radon concentration indoors and outdoors and the influence of meteorological parameters // Health Phys. 1994. V. 67. P. 283-287.
103. Marley F. Investigation of the influences of atmospheric conditions on the variability of radon and radon progeny in buildings // Atmos Environ. 2001. № 35. P. 5347-5360.
104. Bossew P., Lettner H. Investigations on indoor radon in Austria, Part 1: Seasonality of indoor radon concentration // J Environ Radioact. 2007. № 98. P. 329-345.
105. Онищенко А.Д., Жуковский М.В., Васильев А.В. Влияние временных вариаций уровней радона и погрешностей измерений на оценку средних сезонных значений объемной активности радона в помещении // АНРИ. 2013. № 3. С. 2-12.
106. Ярмошенко И.В., Жуковский М.В., Екидин А.А. Моделирование поступления радона в жилище // АНРИ. 1999. №4, С. 17-26.
107. Postendorfer J., Wicke A., Schraub A. The influence of exhalation, ventilation and deposition processes upon the concentration of radon

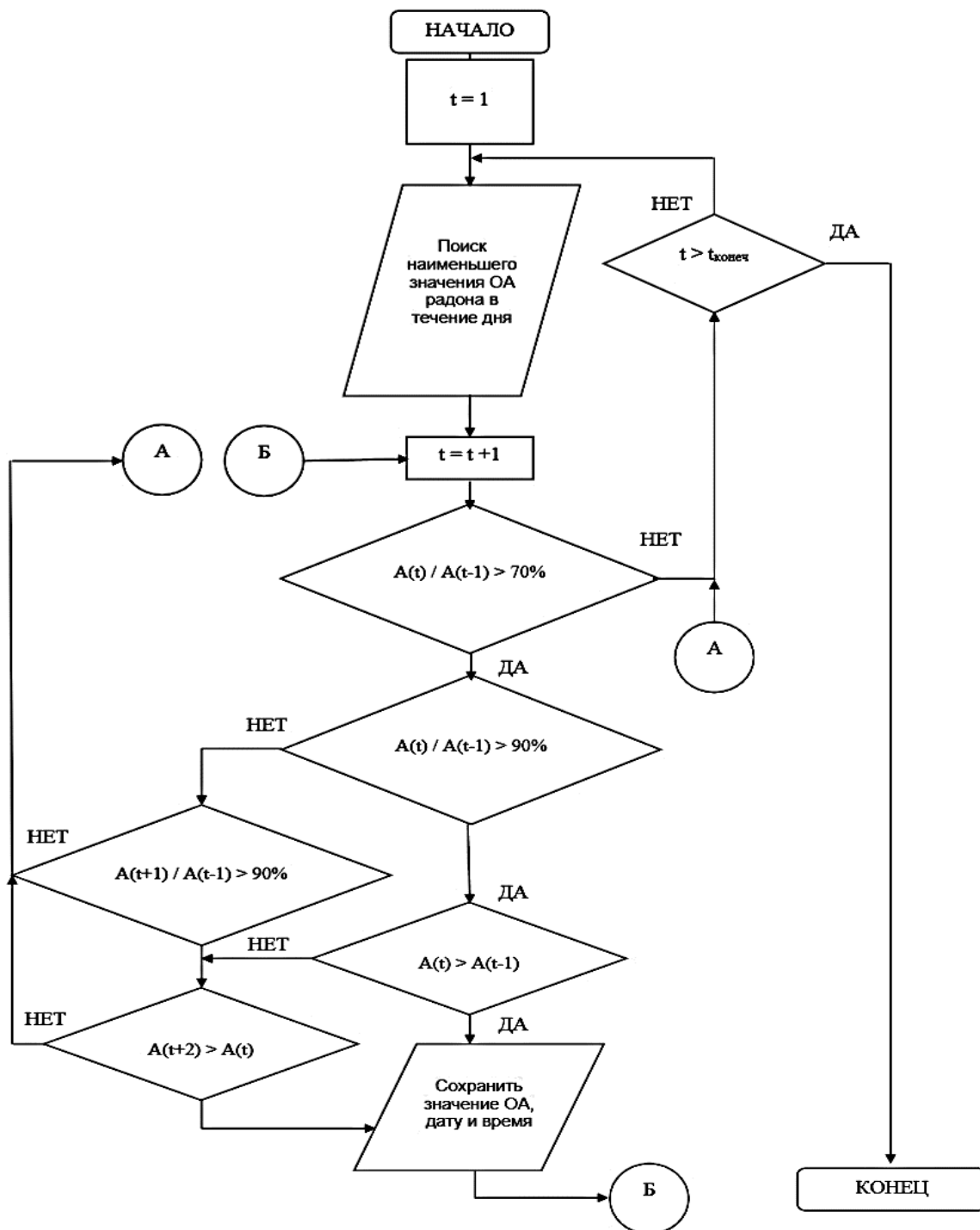
- (^{222}Rn) and thoron (^{220}Rn) and their decay products in room air // Health Phys. 1978. № 34 (5). P. 465-473.
108. Yu C., LePoire D.J., Cheng J.-J., Gnanapragasam E., et al. User's Manual for RESRAD-BUILD Ver.3. ANL/EAD/03-1. Argonne, Illinois: Argonne National Laboratory, 2003.
109. Орловский, Ю.И. Радонная опасность в строительстве и защита от нее // Строительные материалы. 2007. № 5. С. 58-61.
110. Tuccimei P., Moroni M., Norcia D. Simultaneous determination of ^{222}Rn and ^{220}Rn exhalation rates from building materials used in Central Italy with accumulation chambers and a continuous solid state alpha detector: Influence of particle size, humidity and precursors concentration // App Radiat Isotopes. 2006. № 64. P. 254-263.
111. Van der Graaf E.R., Schaap L.E., Bosmans G. Radiation performance index for Dutch dwellings: consequences for some typical situations // Sci Total Environ. 2001. № 272. P. 151-158.
112. Гигиенический комфорт жилища / Обзорная информация №9, ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре, М.: Стройиздат, 1982. 28 с.
113. ТСН ОВК-2000 МО. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Территориальные строительные нормы. Москва, 2000.
114. Oreszczyn T., Hong S., Ridley I., Wilkinson P. Determinants of winter indoor temperatures in low income households in England // Energy Build. 2006. № 38. P. 245-252.
115. Lee Thomas K.C., Yu K.N. Effects of air conditioning, dehumidification and natural ventilation on indoor concentrations of ^{222}Rn and ^{220}Rn // J Environ Radioact. 2000. № 47. P. 189-199.
116. Khan A.J. A study of indoor radon levels in Indian dwellings, influencing factors and lung cancer risks // Rad Meas. 2000. № 32. P. 87-92.

117. Katona T., Kanyár B., Somlai J. Cost assessment of ventilation and averted dose due to radon in dwellings // J Environ Radioact. 2005. № 79(2). P. 223-230.
118. Cavallo A., Gadsby K., Reddy T.A. Comparison of natural and forced ventilation for radon mitigation in houses // Env International. 1996. № 22(1). P. 1073-1078.

Средняя и максимальная удельная активность материалов, используемых
для строительства в мире [61-66]

Материал	Средняя удельная активность (Бк/кг)			Максимальная удельная активность (Бк/кг)		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Строительные материалы						
Бетон	40	30	400	240	190	1600
Аэрированный бетон	60	40	430	2600	190	1600
Керамический кирпич	50	50	670	200	200	2000
Бетонный блок	10	10	330	25	30	700
Природный камень	60	60	640	500	310	4000
Природный гипс	10	10	80	70	100	200
Материалы, получаемые в ходе промышленной переработки						
Фосфогипс	390	20	60	1100	160	300
Доменный шлак	270	70	240	2100	340	1000
Зола уноса	180	100	650	1100	300	1500

Блок-схема алгоритма определения переходов между режимами эксплуатации
помещения



(где t – время измерения, ч; $A(t)$ – ОА (концентрация) радона в данный момент времени t , Бк/м³).