

На правах рукописи



**КАЛАЙДО АЛЕКСАНДР ВИТАЛЬЕВИЧ**

**МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА  
РАДОНА В СИСТЕМЕ СРЕД «ГРУНТ-АТМОСФЕРА-ЗДАНИЕ»**

05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского  
хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» Минстроя России.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Бакаева Наталья Владимировна**

Официальные оппоненты: **Сидельникова Ольга Петровна**,  
доктор технических наук, профессор  
Институт архитектуры и строительства  
ФГБОУ ВО «Волгоградский  
государственный технический университет»,  
кафедра «Безопасность жизнедеятельности в  
техносфере», профессор

**Сидякин Павел Алексеевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
Институт сервиса, туризма и дизайна  
(филиал) ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский  
федеральный университет» в г. Пятигорске,  
кафедра «Строительство», профессор

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт промышленной  
экологии Уральского отделения Российской  
академии наук (г. Екатеринбург)

Защита состоится «09» декабря 2017 г. в 12.30. на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.094.03, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», по адресу: 302026, г. Орел, ул. Московская, 77, ауд.426.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» <https://www.oreluniver.ru>.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

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



Бакаева Наталья Владимировна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** К настоящему времени установлено, что не менее 2/3 годовой индивидуальной дозы облучения от всех источников ионизирующего излучения население получает в зданиях от радона и его дочерних продуктов распада. Поскольку современный человек проводит в помещениях около 7000 часов в год, то обеспечение радоновой безопасности зданий является крайне важной задачей системы экологической безопасности строительства. При этом радоновая компонента облучения населения является регулируемой и может быть существенно снижена путем реализации ряда технических мероприятий, осуществляемых строительными средствами.

Требования ограничения величины облучения населения радоном в зданиях нашли отражение в Федеральных Законах № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» и № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». С целью их выполнения Нормами радиационной безопасности НРБ-99/09 и Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010 в качестве контрольного параметра радоновой ситуации принята эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов распада радона (ЭРОА), для которой и установлены предельные уровни. Радоновая безопасность здания закладывается на стадии проектирования подземных ограждающих конструкций, способных оказывать эффективное сопротивление поступлению почвенного воздуха.

Материалы и конструктивные решения, используемые в современном строительстве, позволяют регулировать поступление радона в здания в широких пределах. Таким образом, не требующие обслуживания и затрат на эксплуатацию элементы пассивной защиты зданий от радона способны обеспечить достаточно низкие значения ЭРОА в помещениях, возводимых практически на любых грунтах. Однако на данный момент отсутствуют достоверные методы проектного расчета поступления радона в здания. Причиной тому многофакторный характер процесса формирования радоновой обстановки в здании, существенно ограничивающий возможности его продуктивного натурного исследования. Разнонаправленность действия факторов, влияющих на величину ЭРОА в помещении, и отсутствие возможности инструментального контроля отдельных из них приводят к потере или неверной интерпретации информации об особенностях процесса. Поэтому математическое моделирование радоновой обстановки зданий более перспективно в плане описания многофакторных процессов и требует значительно меньших временных и материальных затрат, чем проведение длительных натуральных исследований и обработка полученных данных.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблема модельного исследования поступления радона в помещения достаточно нова, хотя базовый подход к ее решению был разработан Крисюком Э.М. еще в 1980-х. В большинстве работ рассматривается либо перенос радона из грунта непосредственно в атмосферу, либо поступление радона в здание

рассчитывается без учета геологического пространства под ним. Среди наиболее значимых исследований российских ученых следует отметить работы Бекмана И.Н., Паровика Р.И., Маренного А.М., Сидельниковой О.П., Яковлевой В.С., Цапалова А.А., Кувшинникова С.И., Кургуза С.А., Андреева А.И. и др.

Принципиально новое направление исследований было предложено в работах представителей научных школ Гулябанца Л.А. (НИИСФ РААСН) и Жуковского М.В. (ИПЭ УрО РАН). Его суть состоит в рассмотрении системы сред «грунт-атмосфера-здание» как единой системы сред, состоящей из ряда взаимодействующих подсистем. Полученные авторами результаты указывают на перспективность подобного подхода.

В зарубежной научной литературе также определенное внимание уделяется поступлению радона в здания из грунтового основания. Особо следует отметить работы, выполненные американскими (Minkin L., Gadgil A.G., Revzan K., Fisk W.J., Sherman M.H.), британскими (Wang F., Ward I.C.) западноевропейскими (Kohl T., Medici F., Rybach L.), скандинавскими (Jelle B.P., Andersen C.E., Majborn B.) и другими учеными. При этом для описания переноса радона используются аналитические, полуаналитические и численные методы в одно-, двух- и трехмерной постановке, однако получаемые результаты зачастую противоречивы. Сложность и многофакторность данного процесса, являясь причиной отсутствия установившегося мнения относительно механизма переноса радона в пористых средах, указывает на проблематичность разработки универсальной математической модели. В таких условиях более перспективна разработка модели, имеющей ограниченную область применения (определенные типы конструкции пола), но корректно описывающей процесс накопления радона с учетом всех значимых факторов влияния. При этом поведение данных факторов может быть определено только в условиях целенаправленного лабораторного эксперимента.

Двухмерная стационарная модель диффузионного переноса радона в системе сред «грунт-атмосфера-здание» представлена впервые.

**Цель работы** состоит в развитии научного подхода к определению радонозащитных характеристик подземных ограждающих конструкций зданий на стадии их проектирования.

В соответствии с целью в работе поставлены и решены следующие задачи:

- на основе анализа научной литературы грунт под зданием определен как основной источник поступления радона в воздух помещений нижнего этажа;
- теоретически обосновано доминирование диффузионного механизма переноса радона из грунтового основания в здание, подземные ограждающие конструкции которого не являются дефектными;
- экспериментально подтверждена актуальность решения проблемы ограничения облучения населения радоном на территориях, не относящихся к потенциально радоноопасным (на примере города Луганска);

- по результатам лабораторного эксперимента обоснована целесообразность введения «эквивалентного» коэффициента диффузии радона в материале, учитывающего влияние термодиффузии на перенос радона;

- разработана математическая модель переноса радона в системе «грунт-атмосфера-здание»;

- предложена методика определения оптимального сопротивления радонопроницанию подземных ограждающих конструкций зданий на стадии их проектирования.

**Научная новизна** заключается в разработке методологического аппарата совершенствования технологии проектирования зданий с целью обеспечения их радоновой безопасности и определяется следующими результатами:

- впервые представлена математическая модель стационарного диффузионного переноса радона в системе «грунт-атмосфера-здание» в двухмерной постановке, учитывающая влияние термодиффузионных эффектов;

- получены результаты расчетов, демонстрирующие взаимосвязь основных параметров формирования радоновой обстановки в здании;

- предложена отличная от известных методика расчета радонозащитных характеристик подземных ограждающих конструкций зданий, позволяющая сравнивать до шести вариантов конструкции основания, включающего до шести слоев материалов с различными физическими характеристиками.

**Теоретическая значимость работы:**

- выполнен анализ результатов экспериментальных исследований уровней радона в зданиях, позволивший идентифицировать грунтовое основание как основной источник радона в воздухе помещений;

- по результатам анализа известных математических моделей поступления радона в здания обоснован диффузионный механизм переноса радона из грунтового основания в помещения нижнего этажа;

- показана целесообразность использования «эквивалентного» коэффициента диффузии радона при моделировании радоновой обстановки в здании;

- разработана математическая модель стационарного диффузионного переноса радона, рассматривающая грунт, атмосферу и здание как единую систему.

**Практическая значимость работы:**

- экспериментальное подтверждение значимости проблемы ограничения облучения радоном населения потенциально нерадоноопасных территорий;

- получение результатов расчетов, демонстрирующих взаимосвязь между параметрами, оказывающими влияние на поступление радона в здание;

- разработка программы для расчета подземных ограждающих конструкций зданий с позиций определения их оптимальных радонозащитных характеристик;

- результаты диссертационного исследования могут быть использованы в процессе преподавания дисциплин профессионального цикла для студентов и магистрантов, обучающихся по направлению 8.03.01 и 8.04.01 «Строительство».

**Методология и методы исследования.** Методология включала в себя системный подход, абстрактно-логический и монографический методы. Из экспериментальных методов использовались эксперимент, сравнение и моделирование; из теоретических – идеализация, формализация и корреляционный анализ.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- критерии определения потенциальной радоноопасности участка застройки;
- обоснование доминирующего механизма переноса радона из грунтового основания в здания;
- факторы, определяющие интенсивность поступления радона в здания;
- математическая модель переноса радона в системе «грунт-основание-здание»;
- результаты численного моделирования переноса радона в системе сред «грунт-атмосфера-здание»;
- методика определения радонозащитных свойств горизонтальных подземных ограждающих конструкций зданий на стадии проектирования.

**Степень достоверности и апробация результатов работы.**

Достоверность исследований основывается на использовании базовых гипотез теории массопереноса, а также подтверждается сопоставлением теоретических результатов, полученных с использованием разработанной математической модели, с экспериментальными данными природных исследований, проведенных в Луганске. Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 7 Международных, всероссийских и региональных конференциях и симпозиумах: II Международной научно-практической конференции «Возрождение, экология, ресурсосбережение и энергоэффективность инженерной инфраструктуры урбанизированных территорий Донбасса: традиции и инновации» (г. Луганск, 28 сентября 2017 г.); Международной научной конференции VIII Академических чтений, посвященных памяти академика РААСН Осипова Г.Л. «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность», (г. Москва, 3-5 июля 2017 г.); I Международной научно-практической конференции «Современные экологические проблемы и пути их решения», посвященной юбилею Луганского национального аграрного университета (г. Луганск, 22-23 ноября 2016 г.); 8-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и охраны труда» (г. Курск, 12 мая 2016 г.), II Международном семинаре «Перспективы развития программных комплексов для расчета несущих систем зданий и сооружений» (г. Курск, 17 сентября 2015 г.); 4-й международной научно-практической конференции «Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и строительном комплексах», посвященной 55-летию

строительного факультета и 85-летию БГИТУ (г. Брянск 1–2 декабря 2015 г.); V Международном съезде ветеринарных фармакологов и токсикологов «Актуальные проблемы и инновации в современной ветеринарной фармакологии и токсикологии» (г. Витебск, 26-30 мая 2015 г.); Всеукраинской научно-практической интернет-конференции с международным участием «Нові матеріали і перспективні технології, охорона праці і професійна освіта» (г. Луганск, 4 апреля 2014 г.).

#### **Реализация результатов работы:**

- результаты диссертационного исследования получены в рамках выполнения фундаментальных научных исследований в НИИСФ РААСН по теме «Развитие теории метода расчета радонового режима здания как единой природно-техногенной системы» в рамках госзадания Минстроя России и РААСН;

- результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс кафедры «Промышленное и гражданское строительство» ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск) при изучении дисциплин «Экологическая экспертиза строительных проектов» и «Биосферосовместимые технологии в строительстве», преподаваемых студентам по направлению подготовки 07.03.01 «Архитектура» и 08.03.01 «Строительство»; магистрантам по направлению подготовки 07.04.01 «Архитектура» и 08.04.01 «Строительство»;

- результаты диссертационного исследования используются в процессе преподавания дисциплин «Основы охраны труда» и «Охрана труда в отрасли» студентам Института торговли, обслуживающих технологий и туризма Луганского национального университета имени Тараса Шевченко, обучающимся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Профессиональное обучение» (по отраслям), «Технологическое образование», «Товароведение», «Гостиничное дело», «Туризм» и «Дизайн».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, из которых одна публикация в издании, входящем в международную реферативную базу Scopus и 8 печатных работ в специализированных профессиональных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 131 странице, из которой 101 страница основного текста. Работа содержит 23 рисунка, пять таблиц и шесть приложений. Список литературы состоит из 177 источников, из которых 81 на русском и 96 на иностранных языках.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность доктору технических наук, профессору Лорену Арамовичу Гулябянцу за научную идею и постановку экспериментальных исследований в работе.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность выбранной темы и степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость; приведены: методология и методы диссертационного исследования; основные положения, выносимые на защиту; степень достоверности и апробация результатов выполненных исследований.

**В первой главе** показана актуальность проблемы облучения населения радоном и его ДПР в зданиях в РФ и за рубежом, рассмотрены современные подходы к обеспечению радоновой безопасности проектируемых и эксплуатируемых зданий. На основании анализа результатов экспериментальных исследований установлено, что грунтовое основание здания является главным источником радона в воздухе помещений, поэтому радонозащитные свойства зданий должны закладываться на стадии проектирования и обеспечиваться подземными ограждающими конструкциями. Как следствие, важнейшим аспектом обеспечения радоновой безопасности зданий является понимание механизма переноса радона через подземные ограждающие конструкции здания. Кроме того, экспериментальной оценки требует актуальность радоновой проблемы для потенциально нерадоноопасных равнинных территорий.

**Вторая глава** посвящена анализу известных моделей радоновой обстановки в здании с целью теоретического обоснования вида математической модели переноса радона в системе «грунт-атмосфера-здание».

Перенос радона в пористой среде может осуществляться посредством диффузии и/или конвекции. Разность концентраций радона в почвенном воздухе и воздух помещений, составляющая десятки-сотни тысяч Бк/м<sup>3</sup>, является движущей силой *молекулярной диффузии*, также на процесс переноса радона могут оказывать влияние градиенты температуры и давления. В этом случае уравнение диффузионного переноса (закон Фика) имеет вид

$$\frac{\partial A}{\partial t} = D \nabla \left( \nabla A + \frac{k_T}{T} \nabla T + \frac{k_P}{P} \nabla P \right) - \lambda A + G, \quad (1)$$

где  $A$  – объемная активность радона в почвенном воздухе, Бк/м<sup>3</sup>;

$D$  – коэффициент диффузии бинарной смеси, м<sup>2</sup>/с;

$k_T$  и  $k_P$  – безразмерные коэффициенты термо- и бародиффузии;

$T$  – температура, К;

$P$  – давление, Па;

$\lambda$  – постоянная распада радона, с<sup>-1</sup>;

$G$  – генерация радона в материале, Бк/(м<sup>3</sup>·с).

Принято считать, что эффекты бародиффузии в реальных условиях пренебрежимо малы, а термодиффузия может играть ощутимую роль лишь при значительных температурных градиентах, однако данное утверждение требует экспериментального подтверждения.

Движущей силой *конвективного* переноса радона через подземные ограждающие конструкции выступает отрицательная разность давлений в здании и грунте под ним (~ 1-5 Па). Чаще всего она вызвана более низкой



наружной температурой (стек-эффект), также перепады давления может создавать ветровая нагрузка и использование систем вытяжной вентиляции. Конвективный перенос описывается законом Дарси

$$v = -\frac{k}{\eta} \nabla P, \quad (2)$$

где  $k$  – воздухопроницаемость пористой среды,  $m^2$ ;

$\eta$  – динамическая вязкость почвенного газа,  $Pa \cdot c$ .

Для случая одновременного протекания обоих процессов уравнение конвективно-диффузионного переноса записывается в виде

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \nabla D \nabla A - v \nabla A - \lambda A + G. \quad (3)$$

Все представленные выше механизмы переноса радона могут иметь место при определенном сочетании геофизических и конструктивных факторов. Однако для развития конвективного поступления радона в здание необходимо наличие негерметичностей в его подземной части шириной порядка 7-10 мм. Такие воздушные зазоры являются признаком дефектности ограждающей конструкции. Современные здания характеризуются крайне низкой воздухопроницаемостью подземных ограждающих конструкций, поэтому расчет поступления радона в здание на стадии проектирования следует вести *исключительно с позиций диффузионного переноса*.

Решение (1) в одномерной постановке не позволяет получить достоверных результатов для реальных строительных объектов. В то же время, трехмерная постановка задачи необоснованна, поскольку ширина зданий практически всегда значительно меньше его длины.

Перенос радона из грунтового основания в здание не изменяет разности активностей на границах горизонтальной подземной ограждающей конструкции, поэтому уравнение (1) может быть записано в стационарном виде

$$\frac{\partial A}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

С учетом принятых выше допущений, пренебрегая баро- и термодиффузионными эффектами, уравнение (1) можно записать в виде

$$D \left( \frac{\partial^2 A(x, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x, z)}{\partial z^2} \right) - \lambda \cdot A(x, z) + G = 0. \quad (5)$$

Таким образом, расчет сопротивления радонопроницанию подземных ограждающих конструкций можно производить с позиций исключительно диффузионного поступления радона. Существенно упростить (1) можно, опустив слагаемые, описывающие баро- и термодиффузию. Вклад этих эффектов может быть учтен заменой бинарного коэффициента диффузии на «эквивалентный» коэффициент, однако значимость самих этих эффектов требуют экспериментального подтверждения.

В главе 3 представлены результаты натурных исследований степени радоноопасности помещений равнинных территорий и лабораторных исследований значимости влияния эффектов баро- и термодиффузии на перенос радона в пористой среде.

Оценка радоновой обстановки в зданиях на равнинных территориях производилось в рамках радиационного мониторинга застройки Луганска. Измерения проводились в закрытых (не открывавшихся не менее 24 часов до начала замеров) помещениях, соотношение частного жилья и многоэтажных зданий выбиралось пропорционально их количеству в структуре жилищного фонда каждого из районов города. Результаты измерений показаны на рисунке 1, а, распределение исследованных помещений по величине ЭРОА (согласующееся с лог-нормальным законом) представлено на рисунке 1, б.

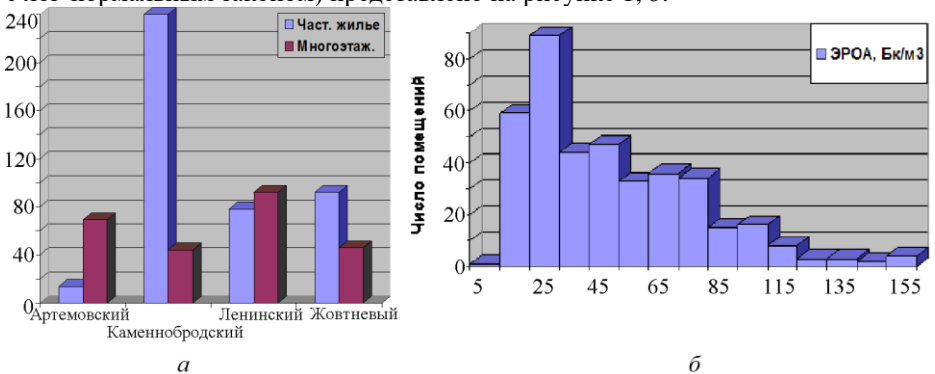


Рисунок 1 – Результаты радиационного мониторинга городской застройки Луганска: а – средние по районам значения ЭРОА в воздухе помещений; б – распределение обследованных помещений по величине ЭРОА

В дальнейшем для проведения интегральных измерений объектами исследования были выбраны все дошкольные образовательные учреждения (ДОУ) наиболее радоноопасного Каменнобродского района, выполненные по типовому проекту и имели сходную архитектуру. Ежемесячно в помещениях с постоянным пребыванием детей выполнялись непрерывные измерения на протяжении не менее 48 часов с интервалом в один час. Среднегодовые значения ЭРОА представлены в таблице 1, гамма-спектрометрический анализ грунтов с территории объектов исследования показал среднее содержание в них радия (29,3 – 35,0 Бк/кг). Таким образом, выполненные в Луганске исследования показали, что:

- проблема облучения радоном в зданиях актуальна и для потенциально нерадоноопасных равнинных территорий, на долю которых приходится около 75% территории Российской Федерации.
- потенциальная радоноопасность участка застройки не может быть определена только по результатам анализа физических характеристик грунтового основания, а должна рассматриваться совместно с особенностями конструкции пола.

Таблица 1 – Результаты радиационного мониторинга ДОУ

ДОУ, адрес	ЭРОА, Бк/м <sup>3</sup>	МЭД, мкЗв/ч	А <sub>ра</sub> , Бк/кг	Годовая доза, мЗв
ДОУ «Ясли-садик № 57», ул. Рудя, 91	220,7	0,115	34,9	5,53
ДОУ «Детский сад № 10», ул. Рудя, 73, а	165,7	0,105	33,4	4,20
ДОУ «Ясли-садик комбинированного типа № 55», ул. 21-го Мюда, 54	244,5	0,110	35,0	6,09
ДУУ «Ясли-садик № 97», ул. Артема, 100	27,0	0,115	37,2	0,92

Исследования значимости баро- и термодиффузии в процессе переноса радона производились на разработанной экспериментальной установке, представлявшей цилиндрическую колонну концентрата циркониевого зернистого (КЦЗ) высотой 1500 мм, заключенную в трубу II из непластифицированного ПВХ с размерами 160×4 мм (рисунок 2). Циркониевый концентрат в данном случае моделирует пористую среду с равномерно распределенными источниками радона, его удельная эффективная активность, измеренная в лаборатории радиационной безопасности в строительстве НИИСФ РААСН, составила

$$A_{эфф} = 4536,2 \pm 366,6 \text{ Бк/кг.}$$

Столь высокая активность концентрата позволяет получать высокие значения плотности потока радона (ППР) с поверхности материала, повышая чувствительность исследований, но при этом сам циркониевый концентрат не относится к радиоактивным материалам, требующим специального обращения.

В заглушке III верхней части установки герметично монтировалась накопительная камера НК-32 с сорбционной колонкой СК-13 с активированным углем для измерения плотности потока радона с поверхности пористой среды методом пассивной сорбции. В нижней камере I установки размещались вводы пневматической и электрической систем.

Перепад температур по столбу пористой среды создавался двумя соединенными параллельно керамическими сопротивлениями  $R_1 = R_2 = 13 \text{ кОм}$ , которые включались в бытовую электрическую сеть через температурный контроллер TC4S, поддерживавший заданную температуру. Измерение поля температур по оси установки осуществлялось тремя погружными высокоточными термометрами. Пневматическая система включала маломощный (2 Вт) компрессор постоянного действия, подающий поток воздуха через поплавковый ротаметр, которым регулировалось избыточное давление в нижней камере.

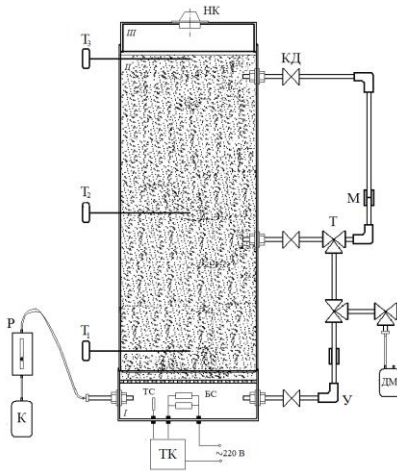
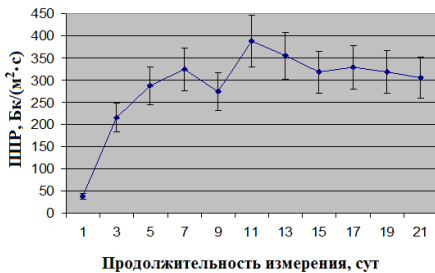
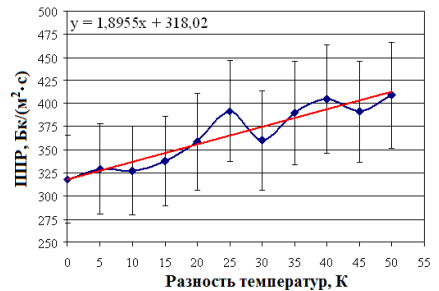


Рисунок 2 – Схема и внешний вид экспериментальной установки: НК – накопительная камера;  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  – погружные термометры; P – ротаметр поплавковый; K – компрессор; ТК – термоконтроллер TC4S; TC – термосопротивление; BC – блок сопротивлений; КД – кран шаровый В-В 1/2"; Т – трехходовой шаровый кран В-В-В 1/2"; У – переходник угловой 90° 1/2"; М – муфта латунная; ДМ – дифференциальный манометр

Исследование включало в себя три этапа непрерывных измерений ППР: в условиях чисто диффузионного переноса ( $\Delta P = \Delta T = 0$ ); при наличии перепада температур; при наличии перепада давлений. На первом этапе измерений непосредственно после герметизации установки наблюдался достаточно быстрый рост ППР, равновесие установилось приблизительно через три недели после начала исследований. Результаты измерений диффузионного потока радона с поверхности пористой среды, представлены на рисунке 3, а.



а



б

Рисунок 3 – Результаты измерения ППР с поверхности физической модели пористой среды: а – в условиях молекулярной диффузии; б – при наличии перепада температур

Результаты исследования значимости термодиффузии показали тенденцию к линейному росту ППР с увеличением разности температур на границах пористой среды (достоверность линейной аппроксимации  $R^2 = 0,8768$ ). При этом из уравнения аппроксимирующей кривой было получено следующее выражение для коэффициента термодиффузии

$$k(\Delta T) = 1 + 0,006 \cdot \Delta T. \quad (6)$$

На третьем этапе исследовался вклад перепада давлений в перенос радона в пористой среде. Посредством компрессора в нижней камере установки создавалось избыточное давление до 80 Па. При каждом из перепадов измерялась ППР, результаты измерений не показали статистически достоверного увеличения ППР при увеличении  $\Delta P$ .

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили обоснованность использования «эквивалентного» коэффициента диффузии вместо коэффициента молекулярной диффузии. Выражение для «эквивалентного» коэффициента диффузии радона было получено в виде

$$D_{\text{эки}} = k(\Delta T) \cdot D = (1 + 0,006 \cdot \Delta T) \cdot D. \quad (7)$$

**В четвертой главе** представлена двухмерная стационарная модель диффузионного переноса радона в системе сред «грунт-атмосфера-здание» (рисунок 4). При построении модели использовались следующие допущения:

- источниками радона являются грунт под зданием, материалы ограждающих конструкций и поступающий наружный воздух;
- перенос радона в грунте и материалах ограждающих конструкций осуществляется исключительно посредством диффузии;
- поступивший радон мгновенно и равномерно распределяется по объему помещения;
- отсутствует горизонтальный перенос радона из грунта через вертикальные подземные ограждающие конструкции, а также перенос радона из помещения нижнего этажа на верхние;
- ширина здания значительно меньше его длины, а само здание симметрично, что позволяет рассматривать половину его длины.

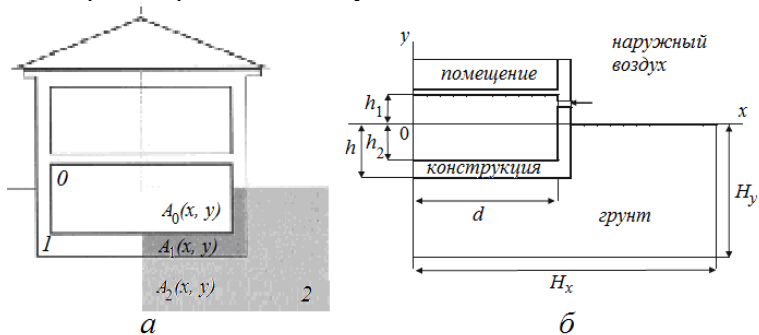


Рисунок 4 – Ситуационная схема (а) и схема привязки элементов системы к координатным осям (б)

Перенос радона в системе сред «грунт-атмосфера-здание» описываем системой линейных уравнений

$$D_0 \left( \frac{\partial^2 A_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_0}{\partial y^2} \right) - (\lambda + \lambda_e) \cdot A_0 + G_0 = 0, \text{ при } 0 \leq x \leq d, -h_2 \leq y \leq h_2; \quad (8)$$

$$D_1 \left( \frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_1}{\partial y^2} \right) - \lambda \cdot A_1 + G_1 = 0, \quad \text{при } 0 \leq x \leq d, -h \leq y \leq -h_2; \quad (9)$$

$$D_2 \left( \frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_2}{\partial y^2} \right) - \lambda \cdot A_2 + G_2 = 0, \quad \text{при } d \leq x \leq H_x, -h \leq y \leq 0; \quad (10)$$

$$0 \leq x \leq H_x, -H_y \leq y \leq h;$$

где  $D_0$ ,  $D_1$  и  $D_2$  – коэффициенты диффузии радона в воздухе, материале конструкции и грунте, соответственно,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$A_0$ ,  $A_1$  и  $A_2$  – объемные активности радона в воздухе помещения, материале конструкции и почвенном воздухе, соответственно,  $\text{Бк}/\text{м}^3$ ;

$G_0$ ,  $G_1$  и  $G_2$  – скорость образования радона в воздухе помещения, материале конструкции и почвенном воздухе, соответственно,  $\text{Бк}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ ;

$\lambda = 2,1 \cdot 10^{-6}$  – постоянная распада радона,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\lambda_e$  – кратность воздухообмена,  $\text{с}^{-1}$ ;

$d$  – половина длины здания, м;

$h$  – точка пересечения оси ординат с плоскостью контакта конструкции пола с грунтом, м;

$h_1$  и  $h_2$  – точки пересечения оси ординат с плоскостью потолка и пола, соответственно, м;

$H_x$  – максимальное расстояние от оси здания, на котором существуют искажения радонового поля, вызванные влиянием здания, м;

$H_y$  – максимальная глубина, с которой радон достигает основания здания, м.

Для рассматриваемой системы граничные условия будут иметь вид:

- объемная активность радона в воздухе постоянна на вертикальных и горизонтальных границах помещения;

$$\frac{\partial A_0}{\partial x} = 0, \quad \text{при } x = 0, -h_2 \leq y \leq h_1; \quad (11)$$

$$x = d, -h_2 \leq y \leq h_1;$$

$$\frac{\partial A_0}{\partial y} = 0, \quad \text{при } 0 \leq x \leq d, y = h_1; \quad (12)$$

- отсутствует поступление радона через вертикальные подземные ограждающие конструкции;

$$\frac{\partial A_2}{\partial x} = 0, \quad \text{при } x = d, -h \leq y \leq 0; \quad (13)$$

- равенство потоков на границе «ограждающая конструкция-воздух помещения»

$$D_1 \frac{\partial A_1}{\partial y} = D_0 \frac{\partial A_0}{\partial y}, \quad \text{при } 0 \leq x \leq d, y = -h_2; \quad (14)$$

- равенство потоков и активностей на границе раздела «ограждающая конструкция – грунт под зданием»

$$D_1 \frac{\partial A_1}{\partial y} = D_2 \frac{\partial A_2}{\partial y}, \quad A_1 = A_2 \quad \text{при } 0 \leq x \leq d, y = -h; \quad (15)$$

- отсутствует поток радона на нижней границе области 2

$$\frac{\partial A_2}{\partial y} = 0, \quad \text{при } 0 \leq x \leq H_x, y = -H_y; \quad (16)$$

- отсутствует поток радона на правой границе области 2

$$\frac{\partial A_2}{\partial x} = 0, \quad \text{при } x = H_x, -H_y \leq y \leq 0; \quad (17)$$

- условие газообмена на границе «грунт-атмосфера»

$$D_2 \frac{\partial A_2}{\partial y} = \alpha(A_2 - A_n), \quad \text{при } d \leq x \leq H_x, y = 0. \quad (18)$$

где  $\alpha = 0,1$  – коэффициент газообмена на поверхности грунта;

$A_n$  – объемная активность радона в атмосферном воздухе, Бк/м<sup>3</sup>.

Разработанная математическая модель переноса радона в системе сред «грунт-атмосфера-здание» использовалась для изучения значимости и направления действия факторов, определяющих радоновую обстановку в здании. В процессе моделирования изменялся только один из параметров, остальные при этом оставались постоянными.

Важнейшим параметром, определяющим количество радона, поступающего в здание из грунтового основания через ограждающие конструкции, является радоновая нагрузка  $N_{cp}$  (средняя активность радона в плоскости контакта основания здания с грунтом). На рисунке 5 представлена зависимость радоновой нагрузки от радонового потенциала грунта и заглубления здания.

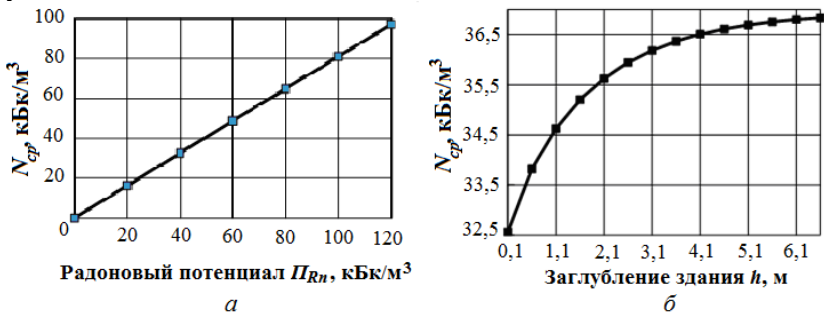


Рисунок 5 – Зависимость радоновой нагрузки на основание здания:  $a$  – от радонового потенциала грунта  $P_{Rn}$ ;  $b$  – от заглубления здания  $h$

Можно видеть, что радоновая нагрузка нелинейно возрастает по мере увеличения заглубления здания и стремится к некоторой постоянной величине – радоновому потенциалу грунта. Сама же радоновая нагрузка на подземные горизонтальные ограждающие конструкции несколько меньше радонового потенциала грунта, причем угол наклона кривой на рисунок 5, *a* определяется сопротивлением радонопроницанию ограждающих конструкций здания.

Также исследовалась зависимость радоновой нагрузки от длины здания и физических характеристик грунта (рисунок 6). С увеличением длины здания растет радоновая нагрузка на подземные ограждающие конструкции, что можно объяснить снижением бокового оттока радона из-под здания в сторону более проницаемого открытого грунта. Зависимость радоновой нагрузки от коэффициента диффузии радона в грунте показана на рисунок 6, *б*. В малопроницаемых грунтах ( $k \leq 10^{-12} \text{ м}^2$ ) низкие значения  $N_{cp}$  связаны с малой мощностью «активного слоя» грунта, формирующего радоновую нагрузку, в высокопроницаемых грунтах данная зависимость становится малозначимой.

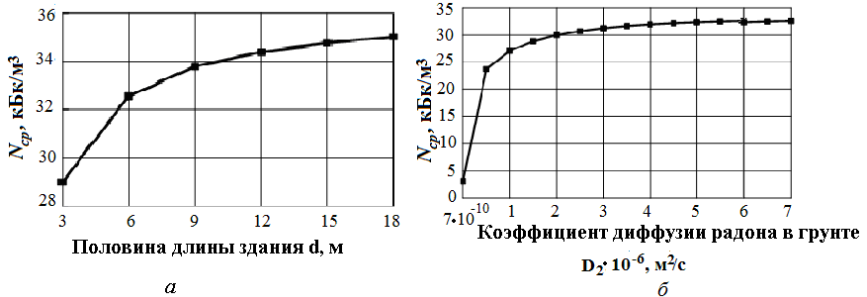


Рисунок 6 – Зависимость радоновой нагрузки на основание здания: *a* – от ширины здания; *б* – от коэффициента диффузии радона в грунте

Разработанная модель позволяет находить поле концентраций радона в грунте под зданием. На рисунке 7 представлены изолинии концентрации радона в грунте, определенные при коэффициенте диффузии  $D_2 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$  для заглублений здания 3 и 6 м, соответственно.

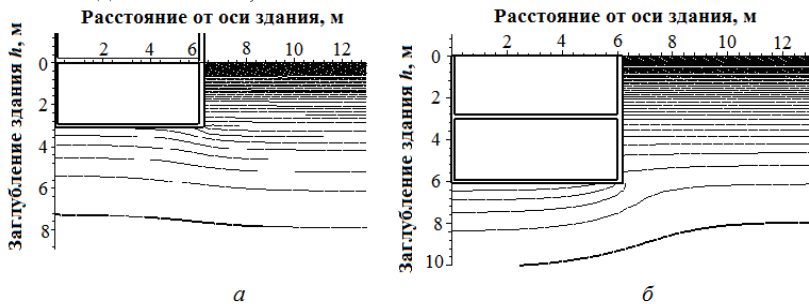


Рисунок 7 – Концентрация радона в грунте при заглублении здания: *a* – 3 м; *б* – 6 м



Нижняя (жирная) изолиния представляет собой радоновый потенциал грунта, в данном случае равный  $45\,000\text{ Бк/м}^3$ , значения остальных линий убывают по направлению к поверхности грунта с шагом  $1\,000\text{ Бк/м}^3$ . Таким образом, здание существенно изменяет природное распределение радона в грунте, при котором изолинии параллельны поверхности земли.

Величина ЭРОА радона в помещении определяется плотностью потока радона  $Q$ , поступающего из грунтового основания через конструкцию пола. Из рисунка 8, *а* видно, что при прочих равных условиях поступление радона через конструкцию пола возрастает прямо пропорционально величине радоновой нагрузки. При этом значение коэффициента пропорциональности определяется сопротивлением радонопроницанию конструкции пола. По мере увеличения сопротивления радонопроницанию конструкции величина  $Q$  нелинейно снижается и стремится к нулю при  $R \rightarrow \infty$  (рисунок 8, *б*).

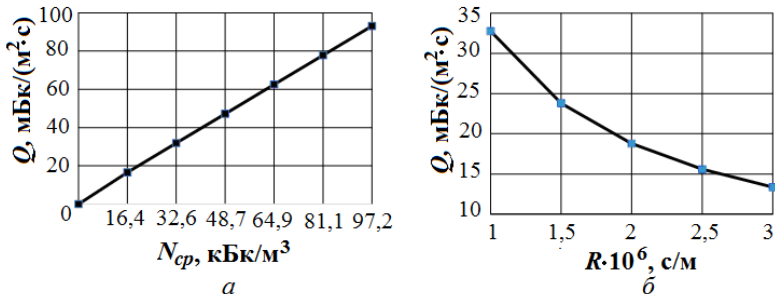


Рисунок 8 – Зависимость плотности потока радона, поступающего в здание из грунта: *а* – от радоновой нагрузки при  $0 \leq C_{Ra,2} \leq 180\text{ Бк/кг}$ ; *б* – от сопротивления радонопроницанию конструкции пола

На рисунке 9, *а* показана зависимость величины сопротивления радонопроницанию бетонной плиты от ее толщины.

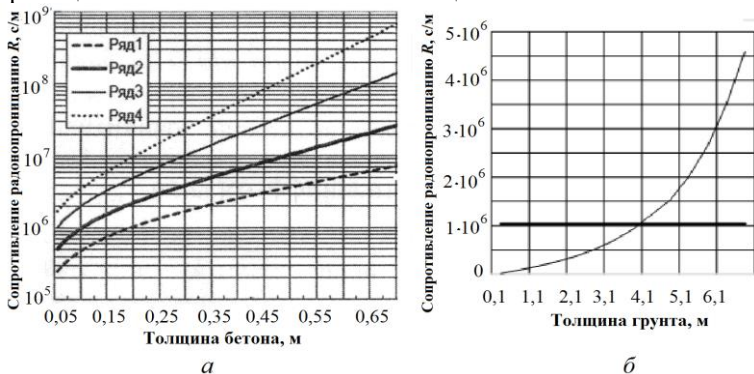


Рисунок 9 – Сопротивление радонопроницанию: *а* – бетонной плиты; *б* – грунта. Ряды: 1 –  $D = 2 \cdot 10^{-7}\text{ м}^2/\text{с}$ ; 2 –  $D = 1 \cdot 10^{-7}\text{ м}^2/\text{с}$ ; 3 –  $D = 5 \cdot 10^{-8}\text{ м}^2/\text{с}$ ; 4 –  $D = 3 \cdot 10^{-8}\text{ м}^2/\text{с}$

Учет сопротивления радонопроницанию грунта важен при возведении многоэтажных зданий. Точка пересечения кривых на рисунке 9, б соответствует заглублению здания, при котором равны сопротивление радонопроницанию конструкции пола (жирная линия) и массива грунта. Если сопротивление грунта станет больше, возникнет боковой приток радона под здание, приводящий к увеличению радоновой нагрузки на ограждающие конструкции.

На основе описанной математической модели разработана методика по определению оптимальных радонозащитных характеристик подземных ограждающих конструкций, алгоритм которой представлен на рисунке 10.

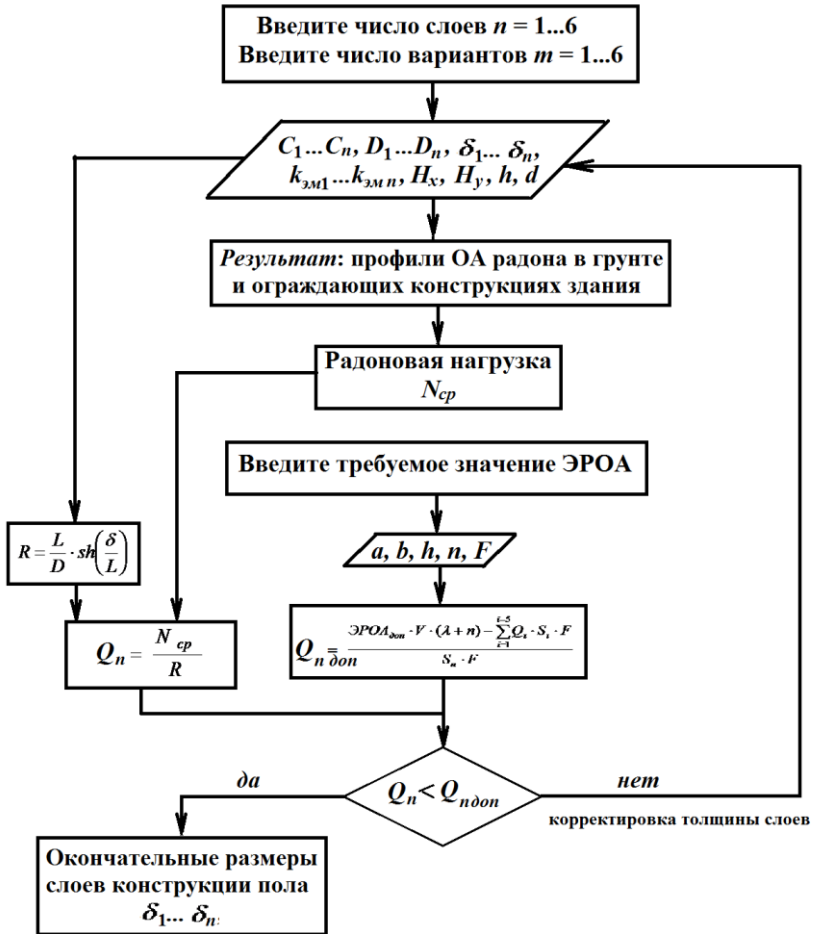


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма расчета характеристик подземных ограждающих конструкций

Поскольку в отдельных случаях конструкция пола может включать до шести различных слоев, в программе предусмотрено задание свойств именно шести слоев и грунтового массива под зданием глубиной 10 м. Если же конструкция пола образована меньшим числом слоев, остальным задаются свойства грунтового массива, а их толщина отнимается от 10 м. Кроме того, программа позволяет одновременно просчитывать до шести различных вариантов конструкции пола здания с целью выбора оптимального решения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие **выводы**:

- определено, что грунтовое основание здания является основным источником радона в воздухе помещений, поэтому радонозащитные свойства зданий должны обеспечиваться подземными ограждающими конструкциями;

- на основе анализа известных математических моделей поступления радона в здания обоснован диффузионный механизм переноса радона из грунтового основания в воздух помещений;

- радиационный мониторинг городской застройки Луганска подтвердил значимость проблемы облучения населения радоном в зданиях равнинных потенциально нерадоноопасных территорий и необходимость учета особенностей конструкции пола при оценке потенциальной радоноопасности участка застройки (наряду с геофизическими характеристиками грунтового основания);

- по результатам лабораторного эксперимента показана необходимость учета разности температур на границах горизонтальной подземной ограждающей конструкции при моделировании поступления радона в здания. Также показана несущественность влияния эффектов бародиффузии на перенос радона;

- с целью упрощения математической постановки задачи предложено введение «эквивалентного» коэффициента диффузии радона в материале, учитывающего вклад термодиффузии в процесс поступления радона в здания;

- разработана математическая модель двухмерного стационарного диффузионного переноса радона, рассматривающая грунт, атмосферу и здание как единую систему, состоящую из взаимодействующих подсистем;

- выполнено численное исследование значимости и направления действия основных факторов, оказывающих влияние на перенос радона в здание;

- на основе математической модели разработана методика проектного расчета оптимальных радонозащитных характеристик горизонтальных подземных ограждающих конструкций зданий.

Предлагаются следующие **рекомендации**:

- использовать предложенную методику при проектировании подземных горизонтальных ограждающих конструкций здания;

- при проектировании заглубленных зданий производить сравнительную оценку сопротивления радонопроницанию подземных ограждающих конструкций и слоя грунта с толщиной, равной заглублению здания во избежание бокового притока радона под здание.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы:**

- расширение области адекватности модели с целью описания поступления радона в здания, отличающиеся по радонозащитным свойствам от проектируемых (частное жилье с подвальными помещениями из кладочных материалов, дома с подвалами под частью здания и т.д.);

- детальное изучение поведения каждого из факторов формирования радоновой обстановки в здании на основании сопоставления модельных расчетов и результатов исследований процесса переноса радона на экспериментальной установке;

- теоретическое и экспериментальное исследование условий существования системы «грунт-атмосфера-здание», при которых описание поступления радона в здания возможно на основе диффузионной модели;

- разработка методики определения сопротивления радонопроницанию строительных материалов с использованием экспериментальной установки.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

**Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях:**

#### *в международной базе данных Скопус*

1. Bakaeva N.V., Kalaydo A.V. Prediction of radon concentrations in above-ground apartments // International Journal of Applied Engineering Science. 2017. Vol. 15, art. 442. Pp. 280 – 286. DOI:10.5937/jaes15-14656.

#### *в специализированных профессиональных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России*

2. Калайдо, А.В. Оценка облучения радоном в эксплуатируемых многоэтажных зданиях / А.В. Калайдо // Строительство и реконструкция.– № 5 (61). – 2015. – С. 56-62.

3. Бакаева, Н.В. Экспериментальные исследования факторов, формирующих радиационный фон зданий / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – № 4 (12). – 2015. – С. 21-27.

4. Бакаева, Н.В. Исследования механизмов поступления радона в здания и эффективности защитных мероприятий / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // Известия Юго-Западного государственного университета.– № 2 (65). – 2016. – С. 33-38.

5. Бакаева, Н.В. Механизмы поступления радона в здания и сооружения / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // Строительство и реконструкция.– № 5 (67). – 2016. – С. 51-59.

6. Бакаева, Н.В. Методы и средства защиты от радона эксплуатируемых зданий и сооружений / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2017. – № 2 (46). – С. 105-113.

7. Гулабянц, Л.А. Математическая модель формирования радоновой обстановки в здании / Л.А. Гулабянц, А.В. Калайдо, М.И. Лившиц // Аппаратура и новости радиационных измерений (АНРИ). – 2017. – № 2 (53). – С. 41-49.

8. Бакаева, Н.В. Условия диффузионного поступления радона в здания и сооружения / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // Современная наука и инновации. – 2017. - № 2 (18). – С. 163-167.

9. Бакаева, Н.В. Математическая модель поступления радона в здания и сооружения / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // Экология урбанизированных территорий. – 2017. - № 1. – С. 69-73.

***в отраслевых изданиях и материалах конференций***

10. Орешкин, М.В. Проблема радоноопасности производственных и жилых помещений в Украине и за рубежом / М.В. Орешкин, И.А. Махнев, А.В. Калайдо // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – № 9 (198). Ч. 2. – 2013. – С. 140-142.

11. Орешкин, М.В. Аналіз шляхів надходження радону всередину приміщень рубежом / М.В. Орешкин, А.В. Калайдо, В.Г. Дедов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – № 16 (205). Ч. 2. – 2013. – С. 186-189.

12. Орешкин, М.В. Мифы и реальность радиационной опасности в Луганской и Донецкой областях / М.В. Орешкин, И.А. Махнев, А.В. Калайдо // Вестник аграрной науки Дона. – № 4 (28). – 2014. – С. 74-80.

13. Орешкин, М.В. Оценка радонового риска помещений / М.В. Орешкин, А.В. Калайдо, В.Г. Дедов // Материалы V Международного съезда «Актуальные проблемы и инновации в современной ветеринарной фармакологии и токсикологии» – Витебск: Изд-во ВГАВМ, 2015. – С. 321-323.

14. Орешкин, М.В. Проблемы радиационной безопасности на Донбассе / М.В. Орешкин, И.А. Махнев, А.В. Калайдо // Материалы V Международного съезда «Актуальные проблемы и инновации в современной ветеринарной фармакологии и токсикологии» – Витебск: Изд-во ВГАВМ, 2015. – С. 324-326.

15. Орешкин, М.В. Исследование распределения уровней радона по высоте зданий / М.В. Орешкин, А.В. Калайдо // Вестник аграрной науки Дона. – № 2 (30). – 2015. – С. 81-88.

16. Бакаева, Н.В. Радиационные аспекты экологической безопасности городской застройки / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // Материалы 4-й международной научно-практической конференции «Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах», посвященной 55-летию строительного факультета и 85-летию БГИТУ – Брянск: Изд-во БГИТУ, 2015. – Т. 2. С. 10-16.

17. Калайдо, А.В. Оценка вклада дочерних продуктов радона в годовую дозу облучения сотрудников Луганского государственного университета имени Тараса Шевченко / А.В. Калайдо // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – № 12 (134). – 2015. – С. 89- 92.

18. Бакаева, Н.В. Оценка вклада излучения строительных материалов в величину годовой дозы облучения / Н.В. Бакаева, А.В. Калайдо // Сборник статей VIII-й международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и охраны труда» – Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2016. – Т. 1. – С. 75-79.

19. Калайдо, А.В. Состояние радиационно-экологической безопасности помещений университета / А.В. Калайдо, А.Г. Жуева // Сборник материалов Научного Форума «Проблемы и перспективы развития науки в университете в условиях Луганской Народной Республики» – Луганск: Альма матер, 2016. – С. 154-162.

20. Калайдо, А.В. Радон в образовательных учреждениях Луганска / А.В. Калайдо // Сборник статей I Международной научно-практической конференции «Современные экологические проблемы и пути их решения» – Луганск: ЛНАУ, 2016 – С. 403-408.

Подписано в печать 09.10.2017 г. Формат 60×90/16. Бумага офсет. Гарнитура Times New Roman. Печать ризографическая. Усл. печ. лист. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 39.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета отделом полиграфии ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко». 91011, г. Луганск, ул. Оборонная, 2.