



DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.01

УДК 699.887

УЧЕТ СВОЙСТВ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ В МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ РАДОНОВОЙ ОБСТАНОВКИ В ЗДАНИИ

Н.В. Бакаева¹, А.В. Калайдо²

¹ Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

² НИИ строительной физики РААСН Минстроя России, Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 12 января 2018

Принята: 23 апреля 2018

Опубликована: 28 сентября 2018

Ключевые слова:

радон, перенос, коэффициент диффузии, влажность, ограждающие конструкции, грунт.

АННОТАЦИЯ

Современный человек получает большую часть годовой дозы облучения от радона и его дочерних продуктов распада, содержащихся в воздухе помещений, поэтому изучение закономерностей формирования радоновой ситуации в здании представляет собой актуальную научно-практическую задачу. Радоновая обстановка в здании является результатом протекания физических процессов переноса радона в системе сред «грунт – атмосфера – здание». Многофакторность процесса формирования радоновой ситуации затрудняет интерпретацию результатов натуральных исследований любой продолжительности, поэтому математическое моделирование является единственным эффективным средством описания поступления радона в помещения нижнего этажа зданий и сооружений.

Объектом настоящего исследования является радиационная безопасность проектируемых зданий и сооружений, а его целью – обоснование вида и характеристик математической модели, позволяющей адекватно описывать поступление радона в проектируемые здания на основании диффузионной модели переноса. В работе использованы экспериментальные (эксперимент и моделирование) и теоретические (идеализация и корреляционный анализ) методы исследования. По результатам лабораторного эксперимента обоснована целесообразность введения «эквивалентного» коэффициента диффузии радона в материале, позволяющего учесть вклад термо- и бародиффузии в процесс переноса радона. Кроме того, предложена математическая модель переноса радона в системе сред «грунт – атмосфера – здание» и получены результаты, демонстрирующие взаимосвязь основных параметров формирования радоновой обстановки в здании.

© ПНИПУ

© Бакаева Наталья Владимировна – доктор технических наук, доцент, e-mail: natbak@mail.ru.

Калайдо Александр Витальевич – младший научный сотрудник, e-mail: kalaydo18@mail.ru.

Natalya V. Bakaeva – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: natbak@mail.ru.

Alexander V. Kalaydo – Junior Researcher, e-mail: kalaydo18@mail.ru.

ACCOUNTING OF THE GROUND PROPERTIES IN THE MODEL OF INDOOR RADON SITUATION FORMATION

N.V. Bakaeva¹, A.V. Kalaydo²

¹ South-West State University, Kursk, Russian Federation

² Research Institute of Building Physics, Russian Academy of Architecture and Building Science, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 12 January 2018
Accepted: 23 April 2018
Published: 28 September 2018

Keywords:

radon, transport, diffusion coefficient, moisture, walling, soil.

ABSTRACT

Last studies have shown that radon and its progeny in indoor air forms the most part of human annual radiation dose. As a result, investigation of the radon situation regularities in a building is an actual scientific and practical problem. Radon situation in a building is the result of the radon transport processes in the “ground – atmosphere – building” media system. The multifactor character of radon situation formation process makes the difficult interpretation of the “in situ” measurements results. Therefore mathematical modeling is the only effective means of radon entry describing into the lower floor apartments of the buildings.

The radiation safety of the designed buildings and structures is the object of this study, and its purpose is to substantiate the type and characteristics of the mathematical model that allows to describe adequately the radon entry into the projected buildings on the basis of diffusion radon transport model. Experimental (experiment and modeling) and theoretical (idealization and correlation analysis) research methods are used in the work. The “equivalent” radon diffusion coefficient in the material introducing justified the laboratory experiment results. This coefficient allows for the contribution of thermodiffusion and bardiffusion effects to the radon transport process. In addition, the mathematical model of radon transport in the “soil – atmosphere – building” media system is proposed; the calculations results showing the relationship between the main radon situation parameters in a building.

© PNRPU

Введение

На протяжении всей своей жизни человек подвергается действию ионизирующих излучений различной природы, из которых наибольший ущерб здоровью наносит облучение радоном и его дочерними продуктами распада (ДПР), формирующее от 55 до 90 % годовой индивидуальной дозы [1, 2]. На данный момент облучение радоном и его ДПР считается вторым по тяжести фактором (после курения), приводящим к раку легких, а сам радон отнесен к канцерогенам первой группы.

С целью обеспечения обоснованно малого риска возникновения канцерогенных эффектов при облучении населения в помещениях Нормами радиационной безопасности НРБ-99/09 установлены контрольные уровни эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) ДПР радона в воздухе помещений, составляющие 200 Бк/м³ для эксплуатируемых зданий и 100 Бк/м³ – для строящихся и реконструируемых.

В подавляющем большинстве случаев основным источником радона, накапливающегося в помещениях, является грунтовое основание здания. Непревышение указанных выше

контрольных уровней может быть обеспечено исключительно строительными средствами за счет применения:

– *пассивных технологий радонозащиты* – использование в конструкции пола материалов с высоким сопротивлением радонопроницанию (барьеры, мембраны и покрытия), герметизация оболочки здания;

– *активных технологий радонозащиты* – вентиляция помещений и подпольного пространства, депрессия грунтового основания, установка коллекторов радона.

В отсутствие геофизических аномалий в основании здания уровни радона в помещениях могут эффективно ограничиваться исключительно пассивными технологиями, необходимость принудительного вентилирования помещений чаще всего указывает на ошибки при проектировании зданий. Кроме того, использование барьеров наиболее целесообразно, поскольку они выполняют еще и непосредственно несущие функции в конструкции здания.

Радоновая обстановка в здании является результатом протекания физических процессов переноса радона в системе сред «грунт – атмосфера – здание». Наибольшее влияние на уровни радона в помещениях оказывают характеристики массива грунта под зданием (содержание радия, газопроницаемость, влажность и т.д.) и особенности конструкции подземной части здания [3], не до конца изучено влияние метеофакторов (изменений температуры и атмосферного давления). Многофакторность процесса формирования радоновой обстановки в здании затрудняет интерпретацию результатов натурных исследований любой продолжительности, тогда как использование даже достаточно простых математических моделей позволяет выявить наиболее существенные закономерности формирования радоновой обстановки в здании.

Любая математическая модель адекватна реальному процессу лишь в части возможных состояний системы сред «грунт – атмосфера – здание», определяемой упрощающими допущениями, принятыми при ее разработке. Современный уровень знаний еще недостаточен для создания универсальной модели формирования радоновой обстановки в здании, поэтому актуальной задачей является разработка модели, адекватно описывающей перенос радона в ограниченных условиях состояния указанной системы.

Основная часть

Перенос радона в грунте может происходить посредством диффузии и (или) конвекции [4, 5], причем доминированию каждого из механизмов соответствуют принципиально различные комбинации свойств грунтового основания и конструкции подземной части зданий. Конвективное поступление характерно для малоэтажных домов с подвалами и подземными стенами из кладочных материалов с высокой воздухопроницаемостью из-за наличия в них швов, воздушных полостей и прослоек. Диффузия радона в ограждающих конструкциях зданий является постоянно действующим механизмом переноса, обусловленным огромной разностью концентраций радона в почвенном воздухе и в воздухе помещений (10^4 – 10^5 Бк/м³) [6, 7]. Для современных зданий характерна высокая герметичность подземной оболочки из материалов с низкой воздухопроницаемостью, что позволяет пренебречь вкладом конвекции в поступление радона.

Аналогично осуществляется перенос радона и в грунтовом основании здания. Диффузия наиболее интенсивно протекает у поверхности земли за счет градиента концентрации радона между почвенным и атмосферным воздухом. Неравномерность поля температур

и давлений может приводить к проявлению термо- и бародиффузионных эффектов, однако П.С. Микляев и др. в [8] отмечают малозначимость подобных эффектов. Напротив, L. Minkin указывает на необходимость включения термодиффузионного потока радона в модель поступления радона в здания [9, 10].

Конвективный перенос радона происходит с потоками порового воздуха под действием внешних сил (силы Архимеда, гидростатического, гидродинамического и пневматического давления). Наиболее активно конвекция протекает в геодинамически активных зонах, где перенос радона осуществляется с глубин до 100 м восходящими газовыми потоками, вызванными высоким геотермальным градиентом [8, 11]. Для равнинных платформенных областей нехарактерна вертикальная фильтрация ввиду значительной мощности рыхлых песчано-глинистых отложений. В таких условиях глубина, с которой радон может достичь подземных ограждающих конструкций, ограниченная его периодом полураспада, в среднем составляет 4–5 м, и даже при наиболее благоприятных для миграции условиях она не может превысить 15 м [12].

Таким образом, радоновая обстановка в зданиях с монолитным фундаментом, расположенных вне зон геодинамической активности, может быть описана исключительно с позиций диффузионного переноса системой дифференциальных уравнений (рис. 1):

$$D_i \left(\frac{\partial^2 A_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_i}{\partial y^2} \right) - \lambda \cdot A_i(x, y) + W_i = 0, \quad i = 0, 1, 2, \quad (1)$$

где D_i – коэффициенты диффузии радона в воздухе, материале конструкции и грунте, $\text{м}^2/\text{с}$; A_i – объемные активности радона в воздухе, материале конструкции и почвенном воздухе, $\text{Бк}/\text{м}^3$; W_i – скорость образования радона в воздухе, материале конструкции и почвенном воздухе, $\text{Бк}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; λ – постоянная распада радона, с^{-1} , $\lambda = 2,1 \cdot 10^{-6}$.

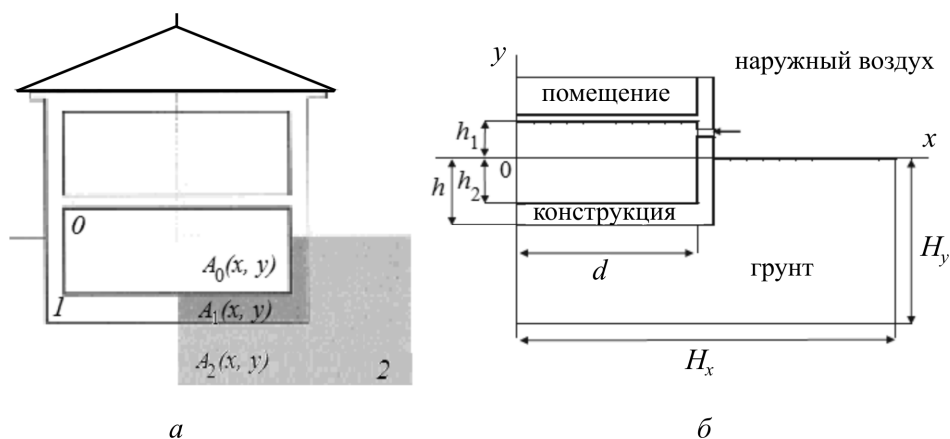


Рис. 1. Ситуационная схема (а) и схема привязки элементов системы к координатным осям (б)
 Fig. 1. Situational scheme (a) and scheme of system elements binding to coordinate axes (b)

Перенос радона из грунтового массива осуществляется к ограждающим конструкциям и непосредственно в атмосферу. В рамках предложенной модели граничные условия должны отражать:

– равенство потоков на границах раздела «грунт – ограждающая конструкция»:

$$D_1 \frac{\partial A_1}{\partial y} = D_2 \frac{\partial A_2}{\partial y}, \quad A_1 = A_2 \quad \text{при} \quad 0 \leq x \leq d, \quad y = -h; \quad (2)$$

– условие газообмена на границе «грунт – атмосфера»:

$$D_2 \frac{\partial A_2}{\partial y} = \alpha (A_2 - A_n), \quad \text{при } d \leq x \leq H_x, y = 0, \quad (3)$$

где α – коэффициент газообмена на границе раздела «грунт – атмосфера»; A_n – объемная активность радона в наружном воздухе, Бк/м³.

Физические свойства грунтового массива и влияние эффектов термо- и бародиффузии (если таковые имеются) в рамках предложенной модели могут быть учтены соответствующим видом коэффициентов диффузии в (1). В научной литературе при описании процессов переноса радона в пористой среде используются такие термины, как «эффективная», «объемная» и «средняя по порам» диффузия, часто означающие разные величины у разных авторов.

В системе уравнений (1) $D_0 = 1,1 \cdot 10^{-5}$ м²/с – коэффициент молекулярной диффузии радона в воздухе. При переносе в грунте уменьшается площадь, через которую радон может диффундировать, а средняя длина пути увеличивается. Учет этих факторов может быть произведен заменой бинарного коэффициента диффузии D_0 на эффективный D_e :

$$D_e = \frac{\varepsilon}{\beta} \cdot D_0, \quad (4)$$

где ε – пористость материала; β – коэффициент извилистости.

Коэффициент β учитывает неоднородности пористой среды, такие как извилистость и гофрировка пор, наличие тупиковых пор и т.п., и в большинстве случаев служит удобным эмпирическим подгоночным параметром [13]. В рамках модели прямолинейных капилляров величина коэффициента извилистости $\beta = 1$.

Выражение (4) справедливо только для сухой почвы. Поскольку грунтовое основание здания защищено от промерзания и атмосферных осадков, его влажность m может считаться постоянной. Эмпирическое выражение для эффективного коэффициента диффузии влажной почвы получено V.C. Rogers и K.K. Nielson в [14] (при $\beta = 1$):

$$D_e = D_0 \varepsilon \cdot \exp(-6m\varepsilon - 6m^{14\varepsilon}). \quad (5)$$

Также для определения эффективного коэффициента диффузии радона во влажной почве может быть использовано выражение, приведенное в [15]:

$$D_e = \frac{(\varepsilon_a + K_T \varepsilon_w)}{\beta} \cdot D_0, \quad (6)$$

где ε_a и ε_w – газовая и водная пористости; K_T – коэффициент разделения радона между газовой и водной фракцией.

Предложенная выше замена позволяет учесть влияние влажности и пористости грунта на интенсивность молекулярной диффузии. Для учета возможного вклада термо- и бародиффузии в перенос радона в пористых средах эффективный коэффициент диффузии радона, в свою очередь, может быть заменен на некий условный «эквивалентный» коэффициент диффузии:

$$D_{\text{эkv}} = D_e \cdot k(\Delta T) \cdot k(\Delta P), \quad (7)$$

где $k(\Delta T)$ и $k(\Delta P)$ – безразмерные коэффициенты, учитывающие зависимость коэффициента диффузии от перепада температур и давлений в пористой среде.

Математическое моделирование наиболее эффективно в том случае, когда используется в сочетании со специальными экспериментами. С целью изучения вклада баро- и термодиффузии в процесс переноса радона в лаборатории радиационной безопасности в строительстве НИИСФ РААСН была разработана лабораторная установка, представляющая цилиндрическую колонну концентрата циркониевого зернистого высотой 1500 мм, заключенную в трубу II из ПВХ размерами 160×4 мм (рис. 2). Достаточно высокая удельная эффективная активность циркониевого концентрата ($A_{эфф} \sim 4,5 \cdot 10^3$ Бк/кг) позволяет получить высокие значения плотности потока радона (ППР) с поверхности материала, увеличивая тем самым чувствительность метода исследований.

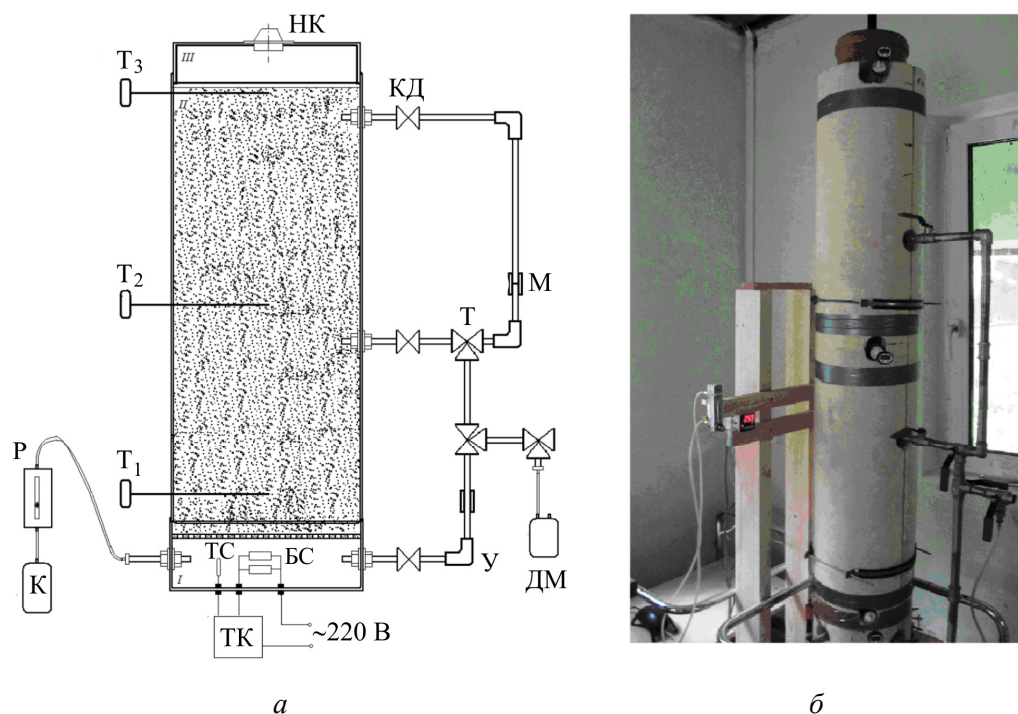


Рис. 2. Схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки: НК – накопительная камера; T₁, T₂ и T₃ – термометры; Р – ротаметр; К – компрессор; ТК – термоконтроллер; ТС – термосопротивление; БС – блок сопротивлений; КД – двухходовой кран 1/2»; Т – трехходовой кран 1/2»; У – переходник угловой 90° 1/2»; М – муфта; ДМ – дифференциальный манометр

Fig. 2. Scheme (a) and appearance (b) of the experimental device: НК – chamber; T₁, T₂ и T₃ – thermometers; Р – rotameter; К – compressor; ТК – thermocontroller; ТС – thermoresistance; БС – resistances block; КД – ball valve 1/2»; Т – three-way ball valve 1/2»; У – corner adapter 90° 1/2»; М – brass coupling; ДМ – differential pressure gauge

Измерение плотности потока радона производилось при помощи накопительной камеры НК-32 с сорбционной колонкой СК-13, заполненной активированным углем. Перепад температур по столбу пористой среды создавался двумя соединенными параллельно керамическими сопротивлениями $R_1 = R_2 = 13$ кОм, которые включались в бытовую электрическую сеть через температурный контроллер ТС4S, 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.

Исследование включало в себя три этапа непрерывных измерений ППР: в условиях молекулярной диффузии ($\Delta P = \Delta T = 0$); при наличии перепада температур ΔT ; при наличии перепада давлений ΔP .

Результаты исследования значимости эффекта 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 прямой было получено выражение для коэффициента термодиффузии:

$$k(\Delta T) = 1 + 0,006 \cdot \Delta T. \quad (8)$$

В то же время результаты измерений при перепадах давлений $\Delta P = 5 \dots 50$ Па не показали статистически достоверного увеличения ППР, что подтверждает предположение ряда авторов о несущественности бародиффузионных эффектов. Таким образом, экспериментальные исследования показали целесообразность использования «эквивалентного» коэффициента диффузии вместо эффективного коэффициента диффузии. Выражение для «эквивалентного» коэффициента диффузии может быть представлено в виде

$$D_{\text{экв}} = (1 + 0,006 \Delta T) \cdot D_0 \varepsilon \cdot \exp(-6m\varepsilon - 6m^{14\varepsilon}). \quad (9)$$

Заключение

Текущая невозможность построения универсальной модели формирования радоновой обстановки в здании обусловлена многофакторностью процесса поступления радона из грунта в помещения нижнего этажа и недостаточным уровнем знаний. В таких условиях актуальной задачей является разработка модели, адекватно описывающей перенос радона в здания определенных типов при конкретных свойствах грунтового основания.

Для материалов подземных ограждающих конструкций современных зданий характерна низкая воздухопроницаемость, что позволяет использовать чисто диффузионную модель переноса радона в пористой среде.

Подход с использованием «эквивалентного» коэффициента диффузии к описанию переноса радона в грунтовом массиве и материалах ограждающих конструкций позволяет расширить область адекватности реальным условиям предложенной математической модели формирования радоновой обстановки в здании.

Библиографический список

1. Сидельникова О.П. Радиационно-экологические аспекты при строительстве зданий // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2013. – № 2. – С. 65–69.
2. Ахременко С.А., Полехина С.В., Шерстюк Е.А. Современные способы противорадоновой защиты // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2015. – № 4. – С. 66–72.
3. Yadav M., Prasad M., Joshi V. A comparative study of radium content and radon exhalation rate from soil samples using active and passive techniques // Radiation Protection Dosimetry. – 2016. – Vol. 171. – P. 254–256.
4. Radon and its decay products in indoor air / eds. William W. Nazaroff, Anthony V. Nero. – 1988. – 518 p.

5. Bakaeva N., Kalaydo A. Prediction of radon concentrations in above-ground apartments // *International Journal of Applied Engineering Science*. – 2017. – Vol. 15, art. 442. – P. 280–286. DOI: 10.5937/jaes15-14656
6. Гулябянц Л.А., Лившиц М.И., Медведев С.В. Определение радоновой нагрузки на подземные ограждающие конструкции здания // *Академия*. – 2016. – № 1. – С. 122–128.
7. Лившиц М.И., Гулябянц Л.А. Математическое решение краевой задачи переноса радона в системе сред «грунт – атмосфера – здание» // *Сборник научных трудов РААСН*. – 2017. – Т. 2. – С. 218–225.
8. Микляев П.С. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий // *АНРИ*. – 2007. – № 2. – С. 2–16.
9. Minkin L. Thermodiffusion in concrete slab as a driving force of indoor radon entry // *Health Physics*. – 2001. – Vol. 80. – P. 151–156.
10. Minkin L. Is diffusion, thermodiffusion or advection a primary mechanism of indoor radon entry? // *Radiation Protection Dosimetry*. – 2002. – Vol. 102. – P. 153–162.
11. Рудаков В.П. О пространственно-временной структуре эманационных полей в связи с проблемой радиозэкологического мониторинга // *АНРИ*. – 2013. – № 2. – С. 52–58.
12. Новиков Г.Ф. Радиометрическая разведка. – Л.: Недра, 1989. – 407 с.
13. Бенда А.Ф. Тепло- и массоперенос в материалах и процессах: учеб. пособие. – М.: МГУП имени Ивана Федорова, 2014. – 236 с.
14. Rogers V.C., Nielson K.K. Multiphase radon generation and transport in porous materials // *Health Physics*. – 1991. – Vol. 60. – P. 807–815.
15. Сахаров В.К. Радиозэкология: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2006. – 320 с.

References

1. Sidel'nikova O.P. Radiatsionno-ekologicheskie aspekty pri stroitel'stve zdaniy [Radiation-environmental aspects in the construction of buildings]. *Biosfernaia sovместimost': chelovek, region, tekhnologii*, 2013, no. 2, pp. 65-69.
2. Akhremenko S.A. Polekhina S.V., Sherstiuk E.A. Sovremennye sposoby protivoradonovoi zashchity [Modern methods of anti-radon protection]. *Biosfernaia sovместimost': chelovek, region, tekhnologii*, 2015, no. 4, pp. 66-72.
3. Yadav M., Prasad M., Joshi V. A comparative study of radium content and radon exhalation rate from soil samples using active and passive techniques. *Radiation Protection Dosimetry*, 2016, vol. 171, pp. 254-256.
4. Radon and its decay products in indoor air. Eds. William W. Nazaroff, Anthony V. Nero, 1988, 518 p.
5. Bakaeva N., Kalaydo A. 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.
6. Gulabiants L.A., Livshits M.I., Medvedev S.V. Opredelenie radonovoi nagruzki na podzemnye ograzhdaiushchie konstruktsii zdaniia [Determination of the radon load in the underground building envelope]. *Akademiia*, 2016, no. 1, pp. 122-128.
7. Livshits M.I., Gulabiants L.A. Matematicheskoe reshenie kraevoi zadachi perenosa radona v sisteme sred «grunt-atmosfera-zdanie» [Mathematical solution of the boundary value problem of radon transfer in the system of media «ground-atmosphere-building»]. *Sbornik nauchnikh trudov RAASN*, 2017, vol. 2, pp. 218-225.

8. Mikliaev P.S. Mekhanizmy formirovaniia potoka radona s poverkhnosti pochv i podkhody k otsenke radonopasnosti selitebnykh territorii [Mechanisms of formation of radon flux from soil surface and approaches to assessment of radon danger in residential areas]. *ANRI*, 2007, no. 2, pp. 2-16.

9. Minkin L. Thermotdiffusion in concrete slab as a driving force of indoor radon entry. *Health Physics*, 2001, vol. 80, pp. 151-156.

10. Minkin L. Is diffusion, thermotdiffusion or advection a primary mechanism of indoor radon entry? *Radiation Protection Dosimetry*, 2002, vol. 102, pp. 153-162.

11. Rudakov V.P. O prostranstvenno-vremennoi strukture emanatsionnykh polei v sviazi s problemoi radioekologicheskogo monitoringa [On the spatial and temporal structure of the emanation fields in the radioecological monitoring]. *ANRI*, 2013, no. 2, pp. 52-58.

12. Novikov G.F. Radiometricheskaia razvedka [Radiometric reconnaissance]. Leningrad, Nedra, 1989, 407 p.

13. Benda A.F. Teplo- i massoperenos v materialakh i protsessakh [Heat and mass transfer in materials and processes]. Moscow, MGUP imeni Ivana Fedorova, 2014, 236 p.

14. Rogers V.C., Nielson K.K. Multiphase radon generation and transport in porous materials. *Health Physics*, 1991, vol. 60, pp. 807-815.

15. Sakharov V.K. Radioekologiya [Radioecology]. Saint Petersburg, Lan', 2006, 320 p.