



## БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ LIFE SAFETY

DOI 10.22363/2313-2310-2020-28-4-361-369

УДК 57.049

Научная статья / Scientific article

### Оценка радиационной активности радона-222 при проектировании жилых зданий

А.В. Сауц<sup>1</sup>✉, В.Н. Сауц<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики,  
Российская Федерация, 190103, Санкт-Петербург, Лермонтовский пр-кт, д. 44, лит. А

<sup>2</sup>Военный институт (инженерно-технический)

Военной академии материально-технического обеспечения имени А.В. Хрулёва,  
Российская Федерация, 191123, Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, д. 22

✉ art\_88@bk.ru

**Аннотация.** Разработана методика, позволяющая выполнить оценку радиационной активности радона-222 с помощью математического моделирования при проектировании жилых зданий в соответствии с правилами проектирования противорадиационной защиты. Методика основана на численном решении уравнений диффузии, теплообмена, Навье – Стокса, дополненном соответствующими моделями турбулентности, начальными и граничными условиями, в частности учитывается процесс естественного распада, седиментации радона-222 в помещении. Выполнена верификация методики для жилого помещения многоквартирного дома, расположенного на территории Санкт-Петербурга. Использование предложенной методики расчета позволяет выявить наиболее радиационно «опасные» места в помещении, рационально организовать воздухообмен и конфигурацию помещения, предупредить развития «синдрома больного здания» и т. д.

**Ключевые слова:** радон-222, радиоактивный распад,  $\alpha$ -излучение, радиоактивное загрязнение помещений

**История статьи:** поступила в редакцию 17.08.2020; принята к публикации 10.10.2020.

**Для цитирования:** Сауц А.В., Сауц В.Н. Оценка радиационной активности радона-222 при проектировании жилых зданий // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2020. Т. 28. № 4. С. 361–369. <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-4-361-369>



## Assessment of radon-222 radiation activity in the design of residential buildings

Artur V. Sauts<sup>1</sup>✉, Valery N. Sauts<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Saint Petersburg University of Management Technologies and Economics, 44 Lermontovskii Prospekt, litera A, Saint Petersburg, 190103, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Military Institute (Engineering and Technical) of the Military Academy of Material Logistics named after General of the Army A.V. Khrulev, 22 Zakharyevskaya St, Saint Petersburg, 191123, Russian Federation*

✉ art\_88@bk.ru

**Abstract.** In this paper, we have developed a method that allows us to evaluate the radiation activity of radon-222 based on mathematical modeling in the design of residential buildings in accordance with the rules for designing anti-radon protection. The method is based on the numerical solution of the diffusion, heat transfer, and Navier – Stokes equations, supplemented by appropriate turbulence models, initial and boundary conditions, in particular, the process of natural decay and sedimentation of radon-222 in the room is taken into account. Verification of the method for residential premises of an apartment building located on the territory of Saint Petersburg was performed. Using the proposed calculation method allows you to identify the most radiation “dangerous” places in the room, rationally organize the air exchange and configuration of the room, prevent the development of “sick building syndrome”, etc.

**Keywords:** radon-222, radioactive decay,  $\alpha$ -radiation, radioactive contamination of premises

**Article history:** received 17.08.2020; revised 10.10.2020.

**For citation:** Sauts AV, Sauts VN. Assessment of radon-222 radiation activity in the design of residential buildings. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2020;28(4):361–369. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-4-361-369>

### Введение

Радон-222 представляет собой газ, не имеющий ни цвета, ни вкуса, ни запаха, опасный для живых организмов вследствие его канцерогенных и радиоактивных свойств. Распад ядер радона-222 и его дочерних изотопов в организме человека способствует процессам, приводящим к лучевым ожогам легочной ткани и раку легкого – одного из самых распространенных видов онкологических заболеваний. Кроме того, курение усиливает негативное влияние радона на организм человека. Рак легких, развившийся после облучения радоном-222, является шестой по частоте причиной смерти от онкологических заболеваний, вызванных неблагоприятной окружающей средой [1].

Источники проникновения радона-222 в жилые здания – приточный наружный воздух, куда он попадает с земной поверхности, и радиоактивные строительные материалы, преимущественно изготовленные из минерального сырья. Поскольку радон-222 тяжелее воздуха, то наибольшую опасность он представляет при скапливании в низинах, подвальных и цокольных помещениях, на нижних этажах зданий. Защита зданий от радонового излучения должна

предусматриваться на этапе их проектирования. В соответствии с правилами проектирования противорадоновой защиты СП 321.1325800.2017, необходимым является выполнение расчета его активности в воздухе помещений [2]. Однако существующие методики являются приближенными и детально не учитывают такие фундаментальные физические процессы, протекающие в воздушной среде, как конвекция, седиментация, диффузия, теплообмен, естественный радиоактивный распад.

Таким образом, цель настоящего исследования – совершенствование методов расчета радиационной активности радона-222 в жилых зданиях.

### Методы и результаты исследования

Активность источника ионизирующего излучения  $A$ , Бк, определяется по формуле

$$A = \frac{dN}{dt}, \quad (1)$$

где  $dN$  – ожидаемое число спонтанных ядерных превращений из данного энергетического состояния;  $dt$  – время, с.

В соответствии с законом радиоактивного распада

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – постоянная распада,  $\text{с}^{-1}$ , для радона-222  $\lambda = -2,0972 \cdot 10^{-6} \text{с}^{-1}$  [3].

Подставив уравнение (2) в (1) и помножив обе части уравнения (1) на молярную массу  $Mr$ , разделив на число Авогадро  $N_a$  и объем пространства  $V$ , получим значение удельной активности  $a$ , Бк/ $\text{м}^3$ :

$$a \cdot \frac{Mr}{N_a V} = -Mr \frac{\lambda N}{N_a V} = -\lambda c,$$

или

$$a = -\lambda N_a c / Mr, \quad (3)$$

где  $c$  – концентрация радиоактивной примеси,  $\text{г}/\text{м}^3$ .

Уравнение (3) свидетельствует о линейном характере зависимости между удельной активностью и концентрацией радиоактивной примеси. Тогда расчет удельной активности радона-222 можно производить с помощью уравнения диффузии:

$$\frac{\partial a}{\partial t} + \nabla(a\vec{V} - k_{xyz}\nabla a) - \frac{\partial(\vec{w}_s a)}{\partial z} + \lambda a = I, \quad (4)$$

где  $\vec{V} = \vec{V}(u; v; w)$  – вектор скорости движения воздуха,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $I$  – эмиссия вещества, Бк/ $(\text{м}^2\text{с})$ ;  $k_{xyz} = \text{diag}\{k_x; k_y; k_z\}$  – коэффициент молекулярной диффузии, для радона-222  $k_x = k_y = k_z = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{м}^2/\text{с}$  [4];  $\vec{w}_s$  – скорость оседания или подъема примеси в воздухе,  $\text{м}/\text{с}$ , определяемая по формуле [5]

$$\vec{w}_s = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho_{\text{газа}} - \rho}{\eta} g r^2, \quad (5)$$

где  $\rho_{\text{газа}}$  – плотность газа, составляющего примесь,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho$  – плотность среды (воздуха),  $\text{кг/м}^3$ ;  $\eta$  – динамическая вязкость среды (воздуха),  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $r$  – радиус частицы (атома) примеси, м.

Эмиссия радона  $I$  из строительного материала определяется как [6]

$$I = c_{Ra}\rho_M E \sqrt{\frac{\lambda D_e}{\varepsilon}} \operatorname{th}\left(d \sqrt{\frac{\lambda \varepsilon}{D_e}}\right), \quad (6)$$

где  $c_{Ra}$  – удельная активность радия-226 в материале слоя,  $c_{Ra} = 50 \text{ Бк/кг}$ ;  $\rho_M$  – плотность строительного материала, для тяжелого бетона  $\rho_M = 2200 \text{ кг/м}^3$ ;  $E = 0,16$  – коэффициент эманирования радона;  $D_e$  – коэффициент диффузии в материале слоя, для тяжелого бетона  $D_e = 7 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  [7];  $\varepsilon = 0,08$  – пористость материала;  $d$  – половина толщины слоя материала, м.

Эмиссию радона-222, поступающего в помещения через неплотности ограждающей конструкции (оконный блок) с наружным воздухом, можно найти как

$$I = a_{\phi} n V_{\text{пом}} / S, \quad (7)$$

где  $a_{\phi}$  – фоновая активность радона-222 в наружном воздухе,  $a_{\phi} = 7 \text{ Бк/м}^3$ ;  $n$  – кратность воздухообмена,  $n = 9,72 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  [8];  $S$  – площадь ограждающей конструкции,  $\text{м}^2$ .

На непроницаемых поверхностях задается условие изоляции/симметрии

$$\vec{n} \cdot (k_{xyz} \nabla a + a \vec{V}) = 0. \quad (8)$$

На остальных границах задается граничное условие «конвективный поток»:

$$\vec{n} \cdot (-k_{xyz} \nabla a) = 0. \quad (9)$$

Для расчета вектора скорости  $\vec{V}$  ( $u; v; w$ ) в помещении используется система уравнений Навье – Стокса и теплопроводности в приближении Буссинеска – Обербека:

$$\begin{cases} \rho_0 \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \nabla [\eta (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - p] + \rho_0 g [\beta_T (T - T_0) - 1], \\ \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla (\lambda \nabla T) + \rho c_p \vec{V} \nabla T = Q, \\ \nabla \vec{V} = 0, \\ \rho = p / (RT). \end{cases} \quad (10)$$

где  $\rho_0$  – плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ , при некой равновесной температуре  $T_0$ , К;  $T$  – температура, К;  $\beta_T$  – коэффициент термического расширения воздуха,  $\text{К}^{-1}$ ;  $p$  – давление, Па;  $c_p$  – изобарная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $Q$  – источник или сток тепла,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $R$  – газовая постоянная, для воздуха  $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

Начальные условия для скорости и давления

$$\begin{cases} \vec{V}(t=0) = 0, \\ p(t=0) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

На непроницаемых поверхностях (стенах) для скорости задается граничное условие прилипания (Wall)

$$\vec{V} = 0. \quad (12)$$

На входной границе (Inlet) задается условие для скорости движения воздуха. В соответствии с [9], допуская, что приток наружного воздуха в помещение является равномерным через весь оконный блок, скорость движения воздуха на входной границе можно найти по формуле

$$V_i = \Delta p / \rho_n R_u. \quad (13)$$

Скорость поступления приточного воздуха принимается равномерной по всей площади оконного блока и определяется как

$$I = nV_{\text{пом}}/S. \quad (14)$$

Учет удаления воздуха из помещения задается с помощью граничного условия Outlet

$$p = 0. \quad (15)$$

Для расчетов поля температур задается начальное условие температуры  $T(t=0) = 249,15 \text{ К}$ .

Учет радиационного теплообмена между внутренними поверхностями стен и источником тепла осуществляется методом сальдо с помощью граничного условия

$$-\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = \varepsilon \left( \frac{J_0 - \varepsilon \sigma T^4}{1 - \varepsilon} - \sigma T^4 \right), \quad (16)$$

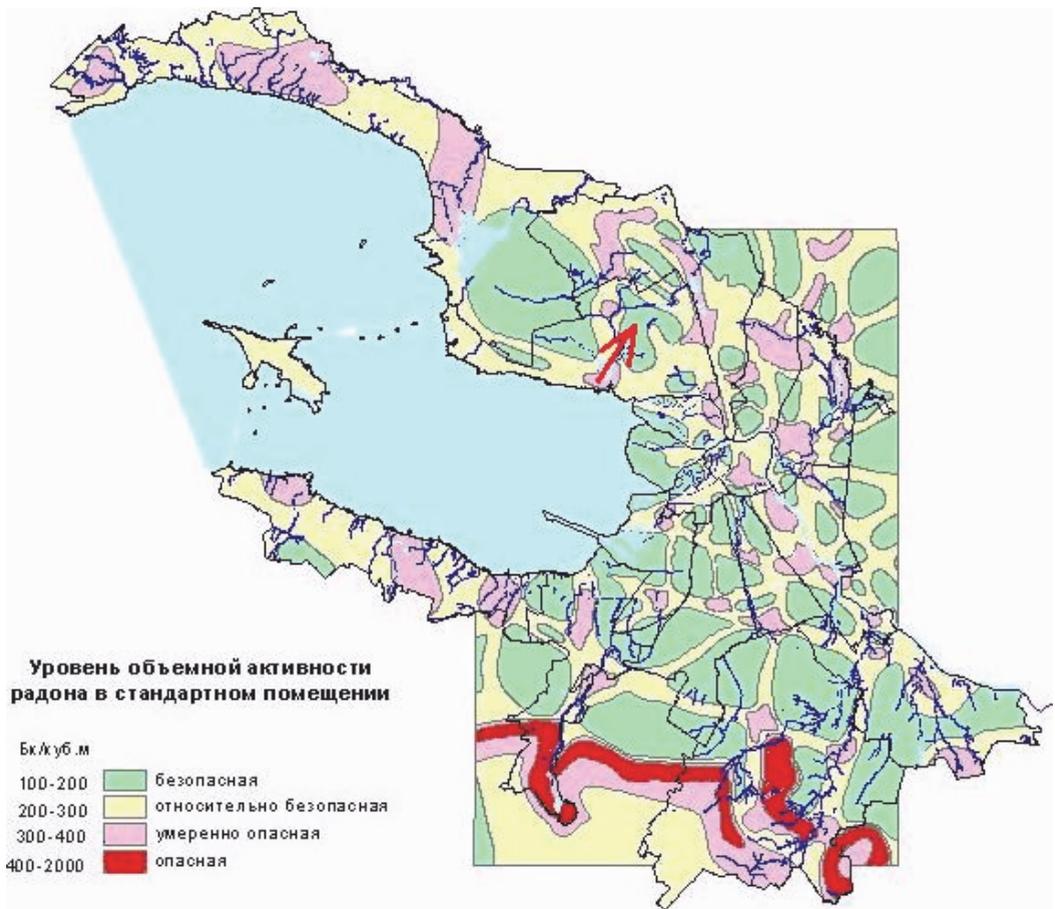
где  $\vec{n}$  – нормальный единичный вектор к граничной поверхности, направленный наружу от граничной области;  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности;  $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} / \text{К}^4$  – константа Стефана – Больцмана;  $J_0$  – радиационный поток, поступающий в помещение,  $\text{Вт} / \text{м}^2$ .

Для учета теплообмена с внешней средой на наружной поверхности стен здания задается условие конвективного и радиационного теплового потока

$$-\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = \alpha_n (T_{\text{inf}}), \quad (17)$$

где  $T_{\text{inf}}$  – температура наружного воздуха, К;  $\alpha_n$  – коэффициент конвективно-теплообмена для наружного воздуха,  $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , определяемый по [8] (в величину  $\alpha_n$  уже заложен учет влияния радиационного теплообмена).

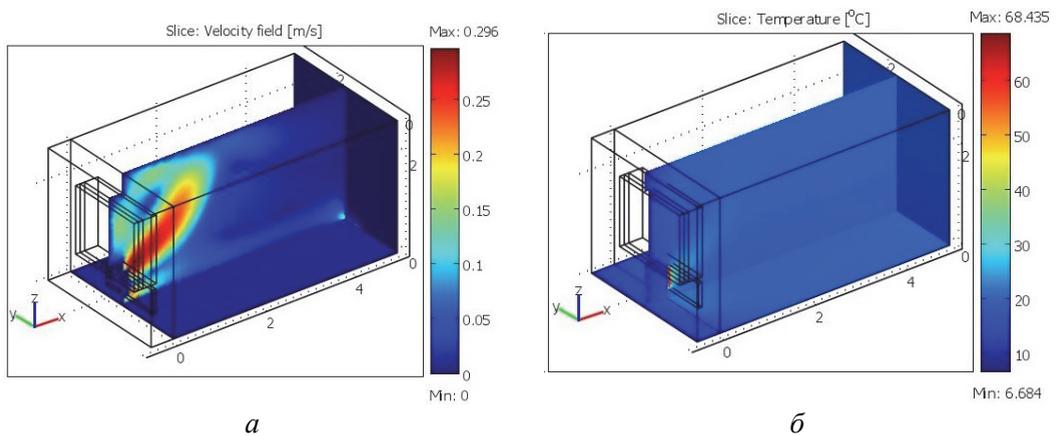
Постановка задачи принята стационарной, ее решение выполняется с использованием метода установления. Программная реализация модели выполнена в среде Comsol Multiphysics 3.5a для комнаты площадью  $17 \text{ м}^2$ , расположенной на первом этаже многоквартирного дома в Приморском районе Санкт-Петербурга. Месторасположение дома указано стрелкой на карте уровня объемной радона в стандартном помещении (рис. 1).



**Рис. 1.** Месторасположение дома на карте уровня объемной активности радона в стандартном помещении  
**Figure 1.** The location of the home on the map of the radon volume activity level in a standard room

## Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены результаты расчетов скорости движения воздуха и температуры в исследуемом помещении.



**Рис. 2.** Результаты расчетов скорости движения воздуха (а), м/с, и температуры в исследуемом помещении (б), °С

**Figure 2.** Results of calculations of air velocity (a), m/s, and temperature in the room under study (b), °C

На рис. 3 приведены результаты расчета удельных активностей радона-222 в исследуемом помещении.

Анализируя результаты расчетов, можно прийти к выводу, что наиболее «опасным» в помещении является пространство вблизи дверного проема, особенно на уровне пола, в силу организации воздухообмена в помещении, а также того, что радон-222 тяжелее воздуха и имеет относительно низкое значение коэффициента молекулярной диффузии.

Расчетная удельная активность радона-222 менее чем в 2 раза превышает среднегодовую эквивалентную равновесную объемную активность дочерних продуктов радона и торона в воздухе помещений ЭРОА = 100 Бк/м<sup>3</sup> [10]. Тем не менее возможно и целесообразно уменьшить активность радона-222 в помещении с помощью увеличения кратности воздухообмена.

Требуемую кратность воздухообмена  $n_{тр}$ , с<sup>-1</sup> можно найти как [8]

$$n_{тр} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i s_i}{V_{пом}(a - a_{тр} - a_{ф})}, \quad (18)$$

где  $I_i$  – эмиссия радона-222 с  $i$ -ой ограждающей конструкции, имеющей площадь  $s_i$ , м<sup>2</sup>;  $V_{пом}$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;  $n_{тр}$  – требуемая активность (ЭРОА) радона-222 в помещении.

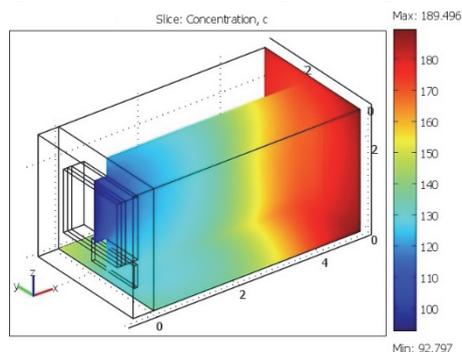
В частности, для нашего примера требуемую кратность воздухообмена следует повысить до  $n_{тр} = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , что почти в 12 раз выше нормативной. Единственный наиболее простой и доступный способ увеличения воздухообмена в помещении – это регулярное проветривание.

### Заключение

Разработана методика, позволяющая выполнить расчет радиационной активности радона на основе математического моделирования при проектировании жилых зданий. Ее использование позволяет выявить наиболее радиационно «опасные» места в помещении, рационально организовать воздухообмен и конфигурацию помещения, предупредить развития «синдрома большого здания», вызванного ошибками проектирования, что представляет практическую значимость в решении задач экологической безопасности, зеленого строительства, гигиены.

### Список литературы

- [1] Darby S., Hill D., Doll R. Radon : a likely carcinogen at all exposures // Annals of Oncology Journal. 2001. Vol. 12. No. 10. P. 27.



**Рис. 3.** Результаты расчета удельных активностей радона-222 в исследуемом помещении, Бк/м<sup>3</sup>  
**Figure 3.** Results of calculation of specific activity of radon-222 in the studied room, Bq/m<sup>3</sup>

- [2] СП 321.1325800.2017. Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты.
- [3] *Васильев А.В.* Радоновая безопасность современных многоэтажных зданий : дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2014. 116 с.
- [4] *Яковлева В.С.* Полевой метод измерения коэффициента диффузии радона и торона в грунте // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2014. № 1 (8). С. 81–85.
- [5] *Муратова Г.В., Глушанин М.В.* Исследование процессов переноса, диффузии и трансформации радиоактивных примесей, поступающих в атмосферу при авариях на объектах энергетики // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14. № 2. С. 1–13.
- [6] *Крисюк Э.М.* Радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 120 с.
- [7] *Keller G., Hoffman B., Feigenspan T.* Radon permeability and radon exhalation of building materials // *Radon in the Living Environment*. Athens, 1999. Pp. 1271–1278.
- [8] СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003.
- [9] СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 (с Изменением № 1).
- [10] СанПиН 2.6.1.2523–09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.

## References

- [1] Darby S, Hill D, Doll R. Radon: a likely carcinogen at all exposures. *Annals of Oncology Journal*. 2001;12(10):27.
- [2] SP 321.1325800.2017. *Residential and public buildings. Radon protection design rules*. (In Russ.)
- [3] *Vasilev AV.* *Radon safety of modern multi-storey buildings* (Dissertation of the Candidate of Technical Sciences). Ekaterinburg; 2014. (In Russ.)
- [4] *Yakovleva VS.* Field method for measuring the diffusion coefficient of radon and torus on in the ground. *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*. 2014;1(8): 81–85. (In Russ.)
- [5] *Muratova GV, Glushanin MV.* Investigation of the processes of transfer, diffusion and transformation of radioactive impurities entering the atmosphere during accidents at energy facilities. *Computational Technologies*. 2009;14(2):1–13. (In Russ.)
- [6] *Krisyuk EM.* *The radiation background of the premises*. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1989. (In Russ.)
- [7] *Keller G, Hoffman B, Feigenspan T.* radon permeability and radon exhalation of building materials. *Radon in the Living Environment*. Athens; 1999. p. 1271–1278.
- [8] SP 60.13330.2012. *Heating, ventilation and air conditioning. Updated edition of SNiP 41-01-2003*. (In Russ.)
- [9] SP 50.13330.2012. *Thermal protection of buildings. Updated edition of SNiP 23-02-2003 (with Amendment No. 1)*. (In Russ.)
- [10] SanPiN 2.6.1.2523–09. *Radiation safety standards NRB-99/2009*. (In Russ.)

### Сведения об авторах:

*Сауц Артур Валерьевич*, кандидат технических наук, доцент, кафедра маркетинга и социальных коммуникаций, Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики. eLIBRARY SPIN-код: 5191-0602. E-mail: art\_88@bk.ru

*Сауц Валерий Николаевич*, кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии, организации и экономики строительства, Военный институт (инженерно-технический), Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева. E-mail: sauc\_valerii@mail.ru

**Bio notes:**

*Artur V. Sauts*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Marketing and Social Communications, Saint Petersburg University of Management Technologies and Economics. eLIBRARY SPIN-code: 5191-0602. E-mail: art\_88@bk.ru

*Valery N. Sauts*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology, Organization and Construction Economics, Military Institute (Engineering and Technical), Military Academy of Material Logistics named after General of the Army A.V. Khrulev. E-mail: sauc\_valerii@mail.ru