

УДК 699.887

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-7-??-??>

А.В. КАЛАЙДО¹, канд. техн. наук (kalaydo18@mail.ru);
В.И. РИМШИН^{1,2}, д-р техн. наук (v.rimshin@niisf.ru);
М.Н. СЕМЕНОВА¹, инженер (lor267gg@yandex.ru)

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

² Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Оценка вкладов диффузионного и конвективного поступления радона в здания

Присутствие радона в жилых и служебных помещениях представляет серьезную проблему, потому как существенный ущерб коллективному здоровью населения достигается крайне малыми концентрациями этого радиоактивного газа. Содержание радона в воздухе помещений ограничивается на законодательном уровне. Рекомендациями международных организаций (МАГАТЭ, ВОЗ, Международная комиссия по радиологической защите) устанавливаются приемлемые дозы облучения радоном, на основании которых каждое государство утверждает собственные национальные контрольные уровни. Обеспечение непревышения законодательно закрепленных уровней радона в воздухе помещений возможно только за счет ограничения его поступления из основного источника. В подавляющем большинстве случаев таким источником выступает грунт под зданием. Уровни радона в помещениях нижнего этажа на 90% формируются за счет его поступления из грунта в основании здания. Почвенный газ, содержащий радон в опасных концентрациях, поступает в помещения через неплотности в подземной оболочке здания за счет конвекции и сквозь подземные ограждающие конструкции посредством диффузии. Величина объемной активности радона в воздухе помещения определяется плотностью потока радона с поверхности пола, которая, в свою очередь, зависит от механизма переноса радона из грунта в здания. В статье рассмотрены закономерности формирования радоновой обстановки в помещениях нижнего этажа во всем диапазоне проницаемостей грунтов – основного фактора, определяющего механизм переноса радона в здание, а также установлены границы доминирования каждого из механизмов переноса.

Ключевые слова: радон, диффузионный перенос, конвективный перенос, контрольный уровень, проницаемость конструкции пола, радоновая обстановка в помещении.

Для цитирования: Калайдо А.В., Римшин В.И., Семенова М.Н. Оценка вкладов диффузионного и конвективного поступления радона в здания // *Жилищное строительство*. 2021. № 7. С. 00–00. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-7-00-00>

A.V. KALAYDO¹, Candidate of Sciences (Engineering) (kalaydo@mail.ru);
V.I. RIMSHIN^{1,2}, Professor, Doctor of Sciences (Engineering) (v.rimshin@niisf.ru);
M.N. SEMENOVA¹, Leading Engineer (lor267gg@yandex.ru)

¹ Research Institute of Building Physics of the Russian Academy Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivnyi Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation)

Assessment of the Contributions of Diffusive and Convective Radon Input Into Buildings

The presence of radon in residential and office premises is a serious problem, because significant damage to the collective health of the population is achieved by extremely low concentrations of this radioactive gas. The content of radon in indoor air is limited at the legislative level. The recommendations of international organizations (IAEA, WHO, International Commission on Radiological Protection) establish acceptable doses of radon exposure, on the basis of which each State approves its own national control levels. Ensuring that the legally prescribed levels of radon in the indoor air are not exceeded is possible only by limiting its intake from the main source. In the vast majority of cases, such a source is the soil under the building. Radon levels in the rooms of the lower floor are formed by 90% due to its intake from the ground at the base of the building. Soil gas containing radon in dangerous concentrations enters the premises through leaks in the underground shell of the building due to convection and through underground enclosing structures by means of diffusion. The value of radon volume activity in the indoor air is determined by the density of the radon flow from the floor surface, which, in turn, depends on the mechanism of radon transfer from the ground to buildings. The article considers the regularities of the formation of the radon environment in the rooms of the lower floor in the entire range of soil permeability – the main factor determining the mechanism of radon transfer into the building, and also establishes the boundaries of the dominance of each of the transfer mechanisms.

Keywords: radon, diffusive transfer, convective transfer, control levels, permeability of floor structure, radon situation in premise.

For citation: Kalaydo A.V., Rimshin V.I., Semenova M.N. Assessment of the contributions of diffusive and convective radon input into buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2021. No. 7, pp. 00–00. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-7-00-00>

Радон – радиоактивный газ без цвета и запаха, повсеместно образующийся в грунтах из материнского радия. Присутствие радона в жилых и служебных помещениях представляет серьезную проблему, поскольку относящийся к канцерогенам группы А радон является второй из причин (после курения) возникновения рака легкого у населения и главной причиной данной онкологии у некурящих. Облучение радоном и его продуктами распада ежегодно вызывает около 21 тыс. смертей в США [1], более 2 тыс. смертей – в Англии [2], в Москве среднее расчетное число дополнительных случаев рака легкого, индуцированных радоном, оценивается в 242 случая в год [3–4].

Специфической особенностью радоновой экспозиции является тот факт, что существенный ущерб коллективному здоровью населения достигается крайне малыми концентрациями данного радиоактивного газа. Так, при объемной активности радона в 400 000 Бк/м³, характерной для урановых шахт, его содержание в воздухе составляет всего лишь 7,6·10⁻¹³%. Регистрация столь малых масс невозможна, поэтому для оценки концентрации радона в воздухе помещений используется его *объемная активность* (ОА, Бк/м³) – число распадов атомов радона в единице объема за единицу времени.

Содержание радона в воздухе помещений ограничивается на законодательном уровне – рекомендациями международных организаций (МАГАТЭ, ВОЗ, Международная комиссия по радиологической защите) устанавливаются приемлемые дозы облучения радоном, на основании которых каждое государство утверждает собственные национальные контрольные

уровни исходя из социально-экономических условий и геофизических особенностей территории. Так, нормами безопасности МАГАТЭ предписывается обеспечение и удержание объемной активности ²²²Rn на разумно достижимом низком уровне, не превышающем 1000 Бк/м³ [5], а ВОЗ декларирует стремление к обеспечению эталонной объемной активности радона в зданиях, равного 100 Бк/м³ [6]. В настоящее время национальный гигиенический норматив для радона в США составляет 150 Бк/м³ [1], в Германии и Великобритании – 200 Бк/м³; в Хорватии – 68 Бк/м³ [7–9]. С совершенствованием технологий строительства значения данных уровней имеют тенденцию к снижению.

Еще одна особенность облучения радоном состоит в том, что всего 2% общей дозы приходится на распад в органах дыхания самого радона-222, а основную дозу человек получает от его дочерних продуктов распада (рис. 1).

При распаде радона первым образуется его дочерний продукт ²¹⁸Po, атомы которого взаимодействуют с примесями воздуха и парами воды, формируя кластеры размером от 0,5 до 3 нм или присоединяясь к аэрозольным частицам. Значительная часть этих кластеров и аэрозолей осаждается в дыхательных путях легких и, не успевая вывестись из-за малого периода полураспада ($T_{1/2}=3,05$ мин), повреждает легочные ткани при распаде трех остальных короткоживущих дочерних продуктов.

Поскольку непосредственное воздействие на организм оказывается не радоном, а дочерними продуктами распада (ДПР), то с практической точки зрения целесообразно измерение именно их активности в воздухе помещения. В этом случае количественной характеристикой выступает *эквивалентная равновесная объемная активность* (ЭРОА) дочерних продуктов распада – объемная активностью газообразного радона в равновесии с его короткоживущими ДПР, имеющей такую же удельную потенциальную энергию альфа-излучения, как и данная неравновесная смесь.

Величина ЭРОА используется при измерении и нормировании уровней радона в России и республиках бывшего СССР, она служит мерой текущего значения суммарной активности неравновесной смеси ДПР в воздухе и связана с объемной активностью радона соотношением:

$$\text{ЭРОА} = \text{ОА} \cdot F, \quad (1)$$

где F – коэффициент сдвига радиоактивного равновесия между радоном и смесью его короткоживущих ДПР.

Величина данного коэффициента находится в интервале $0 \leq F \leq 1$ и зависит от ряда факторов, определяющих скорость удаления дочерних продуктов радона из воздуха помещения. Если измерить F не

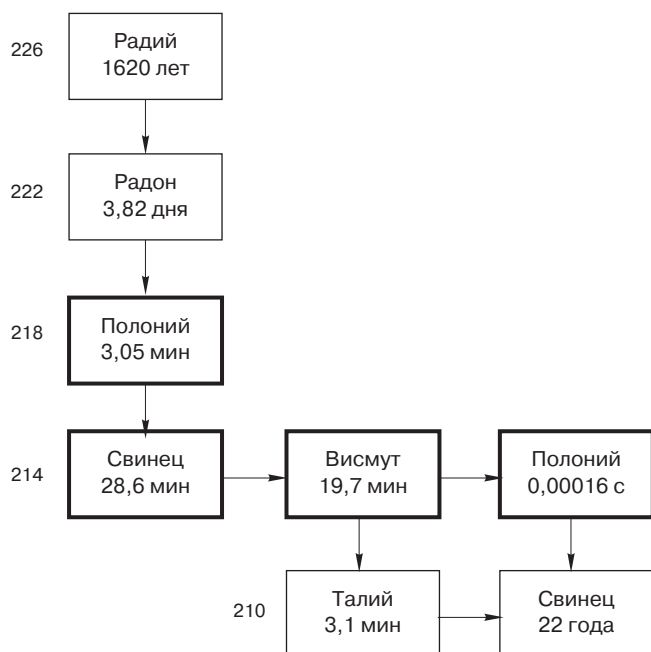


Рис. 1. Дочерние продукты распада радона-222
Fig. 1. Daughter products of radon-222 decay

представляется возможным, его следует принять равным 0,4 согласно Рекомендациям МКРЗ [10], что далеко не всегда справедливо.

Нормами радиационной безопасности в РФ установлен двухуровневый норматив содержания радона в воздухе жилых и служебных помещений: среднегодовая величина ЭРОА в существующих зданиях не должна превышать 200 Бк/м³, а в строящихся и построенных по современным технологиям – 100 Бк/м³ [11]. При невозможности снижения ЭРОА до 400 Бк/м³ (приблизительно 1000 Бк/м³ ОА) рекомендуется перепрофилирование данного объекта в здание без длительного пребывания людей.

Использование двух количественных характеристик содержания радона в воздухе, имеющих одинаковую единицу измерения и не имеющих однозначного перехода от одной к другой, создает определенные сложности отечественным исследователям. По этой причине рядом исследователей отмечается необходимость согласования российского и европейского подходов к оценке содержания радона в воздухе помещений [12].

Обеспечение непревышения законодательно закрепленных уровней радона в воздухе помещений возможно только за счет ограничения его поступления из основного источника. В подавляющем большинстве случаев таким источником выступает грунт под зданием, из которого в воздух помещений поступает более 90% радона [13–15]. Эффективность радонозащитных мер максимальна, если они реализуются в непосредственной близости от источника радона, поэтому общая радонобезопасность здания определяется конструкцией пола и свойствами используемых в ней материалов.

Поступление радона в здания представляет собой сложный процесс, на который оказывают влияние особенности конструкции подземной оболочки здания, физико-механические свойства грунта и климатические параметры, причем часть этих факторов находится в непрерывном изменении. В результате, мгновенное состояние системы «грунт-атмосфера-здание» определяет величину потока радона из грунта в воздух помещений нижнего этажа.

Несмотря на многофакторность процесса формирования радоновой обстановки в здании, ключевым моментом является определение доминирующего механизма переноса радона через подземные горизонтальные ограждающие конструкции. Перенос радона может осуществляться посредством диффузии и конвекции, при этом конвекция обеспечивает поступление значительно больших объемов радона в помещение, но для ее реализации необходимо наличие воздушных зазоров в подземной оболочке здания [16]. Напротив, диффузионный перенос имеет место даже при полностью герметичной оболочке здания.

Важность идентификации доминирующего механизма переноса радона состоит в том, что для каждого из них необходим собственный комплекс радонозащитных мероприятий. Для снижения конвективного поступления применяется герметизация подземной оболочки здания заделкой стыков и швов, а также мест ввода коммуникаций. Для уменьшения диффузионного потока радона данные мероприятия неэффективны, в данном случае необходимо использование в конструкции пола материалов с низким значением коэффициента диффузии радона в них [17].

Диффузионный перенос радона через подземные ограждающие конструкции вызывается разностью его концентраций в грунтовом массиве и воздухе помещения, плотность диффузионного потока определяется из закона Фика:

$$q_{диф} = D_{эф} \cdot \frac{\partial A}{\partial z}, \quad (2)$$

где $D_{эф}$ – эффективный коэффициент диффузии радона в слое фундамента, м²/с; A – объемная активность (концентрация) радона, Бк/м³.

Объемная активность радона в воздухе помещений (десятки – сотни Бк/м³) пренебрежимо мала по сравнению с его активностью в почвенном воздухе, составляющей обычно 30000–50000 Бк/м³ для средних по содержанию радия грунтов, поэтому при расчетах она часто полагается равной нулю. Тогда величина градиента концентраций радона может быть выражена через максимальную объемную активность радона в грунтовом воздухе:

$$\frac{\partial A}{\partial z} \approx \frac{A_{max}}{h}, \quad (3)$$

где h – глубина, на которой достигается максимальная концентрация радона в грунте (обычно 3–5 м), м.

Конвективный поток радона вызван градиентом давлений по глубине грунта, находящимся в диапазоне от 0,1 до 2 Па/м [18], его плотность определяется законом Дарси:

$$q_{кон} = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \cdot A, \quad (4)$$

где k – проницаемость грунта, м²; $\mu=1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с – динамическая вязкость почвенного идеального газа, P – давление воздуха, Па.

В формулах (2) и (4) коэффициентами пропорциональности выступают характеристики грунта – коэффициент диффузии радона $D_{эф}$ и проницаемость k . Величина эффективного коэффициента диффузии радона находится в пределах от 10⁻⁶ м²/с для гравийных почв до 10⁻⁷ м²/с для плотных глин, тогда как проницаемость грунтов изменяется от 10⁻⁹ м² для гравия до 10⁻¹⁴ м² для плотных глин, хотя почвы с проницаемостью выше 10⁻¹⁰ м² достаточно редки [19]. Для материала ограждающих конструкций (бетона) средние значения эффективного коэффициента диффу-

зии и проницаемости составляют $(3-5) \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ и $(0,5-1) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, соответственно [20]. Как видно, проницаемость конструкции пола имеет наибольший диапазон изменения и потому является главным параметром, определяющим механизм поступления радона в здание.

На рис. 2 показано изменение плотностей диффузионного и конвективного потоков радона из грунта в здание при различных проницаемостях конструкции пола. Максимальная величина объемной активности радона в грунте определялась по формуле:

$$A_{\max} = C_{Ra} \cdot \rho_3 \cdot k_{эм}, \quad (5)$$

где C_{Ra} – удельная активность радия в грунте, Бк/кг; $\rho_3 = 2700 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность твердой фазы (зерен) грунта, $k_{эм}$ – коэффициент эманирования радона грунтом.

При определении плотности диффузионного потока радона (кривая 1) коэффициент диффузии принимался равным $D_{эф} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, удельная активность радия – $C_{Ra} = 30 \text{ Бк}/\text{кг}$ и коэффициент эманирования $k_{эм} = 0,3$. Также считалось, что максимальная активность радона достигается на глубине $h = 3 \text{ м}$, что характерно для глинистых почв, как и приведенные выше значения параметров переноса. Расчет плотности конвективного потока выполнялся для двух значений градиентов давлений – 0,5 и 1,5 Па/м.

На рис. 2 можно выделить три области поступления радона в здание:

– область I – чисто диффузионное поступление, которое имеет место при проницаемостях не более 10^{-12} м^2 , характерных для бетонных плит основания или земляных полов без фундаментной плиты, образованных плотными глинистыми грунтами;

– область II – конвективно-диффузионное поступление, соответствующее интервалу проницаемостей от 10^{-12} м^2 до $(2-4) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$. Данные проницаемости соответствуют конструкции пола в виде плавающей плиты с воздушным зазором по периметру помещения или дефектному состоянию плиты основания (сквозные трещины);

– область III – чисто конвективное поступление радона при проницаемостях $5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ и выше. На практике данный диапазон проницаемостей конструкции пола реализуется крайне редко.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для подавляющего большинства зданий поступление радона в помещения нижнего этажа носит диффузионный или конвективно-диффузионный характер, то есть учет диффузионной составляющей

Список литературы

1. Reducing Radon in New Construction of 1 and 2 Family Dwellings and Townhouses (CCAH-2020). AARST Consortium on national radon standards. 33 p.

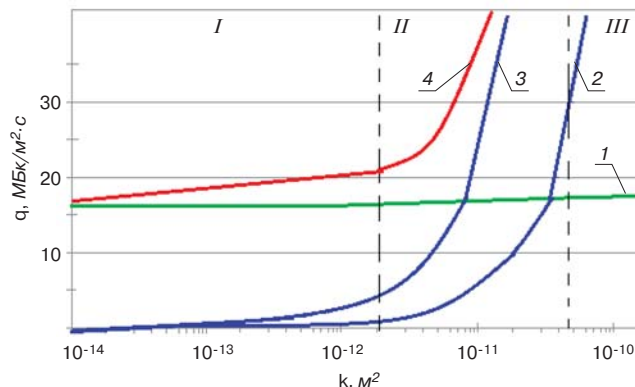


Рис. 2. Зависимость плотности потока радона из грунта в здание от проницаемости конструкции пола: 1 – диффузионный поток; 2 – конвективный поток при $\text{grad } P = 0,5 \text{ Па}/\text{м}$; 3 – конвективный поток при $\text{grad } P = 1,5 \text{ Па}/\text{м}$; 4 – суммарный поток радона при $\text{grad } P = 1,5 \text{ Па}/\text{м}$

Fig. 2. Dependence of the radon flow density from the ground to the building on the permeability of the floor structure: 1 – diffusion flow; 2 – convective flow at $\text{grad } P = 0.5 \text{ Pa}/\text{m}$; 3 – convective flow at $\text{grad } P = 1.5 \text{ Pa}/\text{m}$; 4 – total radon flow at $\text{grad } P = 1.5 \text{ Pa}/\text{m}$

является обязательным. В отличие от конвективного потока, диффузионное поступление практически не зависит от проницаемости конструкции пола. Незначительное его увеличение на рис. 2 при проницаемости выше 10^{-12} м^2 связано с ростом коэффициента диффузии при переходе к менее плотным грунтам или наличием воздушных зазоров в подземных ограждающих конструкциях. В последнем случае целесообразна замена эффективного коэффициента диффузии радона эквивалентным, учитывающим площадь воздушных зазоров:

$$D_{эф} = \frac{D_в \cdot S_н + D_{эф} \cdot (S_{пол} - S_н)}{S_{пол}}, \quad (6)$$

где $D_в$ – объемный коэффициент диффузии радона в воздухе, $\text{м}^2/\text{с}$; $D_{эф}$ – эффективный коэффициент диффузии радона в материале ограждающей конструкции (бетоне), $\text{м}^2/\text{с}$; $S_{пол}$ – общая площадь внутренней поверхности пола, м^2 ; $S_н$ – площадь неплотностей (трещин и зазоров) в конструкции пола, м^2 .

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Проницаемость конструкции пола является главным фактором, определяющим интенсивность поступления радона в помещения нижнего этажа.

2. Обеспечение приемлемых уровней радона в зданиях возможно за счет исключения его конвективного поступления из грунта. Для этого проницаемость конструкции пола не должна превышать 10^{-12} м^2 .

References

1. Reducing Radon in New Construction of 1 and 2 Family Dwellings and Townhouses (CCAH-2020). AARST Consortium on national radon standards. 33 p.

2. Darby S., Hill D., Doll R. Radon: A likely carcinogen at all exposures // *Annals of Oncology*. 2001. № 12, pp. 1341–1351.
3. Роголис В.С. Вклад радона и среды обитания человека в формирование радиоэкологической обстановки в г. Москве // *Геофизический вестник*. 2008. № 6. С. 14–16.
4. Польский О.Г., Варшавский Ю.В., Вербов В.В. Система обеспечения радиационной безопасности населения московского мегаполиса // *Медицина труда и промышленная экология*. 2006. № 2. С. 4–11.
5. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Vienna, 2014. 471 p.
6. World Health Organization, WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective, WHO. Geneva, 2009. 94 p.
7. Darby S., Deo H., Doll R. A parallel analysis of individual and ecological data on residential radon and lung cancer in south-west England // *J R Stat Soc A*. 2001. № 164 (1), pp. 193–203.
8. Beck T.R. Risks and radiation doses due to residential radon in Germany // *Radiation Protection Dosimetry*. 2017. № 175 (4), pp. 466–472.
9. Radolich V., Miklavchich I., Stanich D. Identification and mapping of radon-prone areas in Croatia – preliminary results for Lika-Senj and the southern part of Karlovac counties // *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. № 162 (1–2), pp. 29–33.
10. ICRP: Protection against radon-222 at home and work. International Commission on Radiological Protection Publication 65. Pergamon, 1994. 89 p.
11. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): (Ионизирующее излучение, радиационная безопасность СП 2.6.1.2523-09): зарегистрирован 14 августа 2009 г. Регистрационный № 14534. М.: Минюст России, 2009. 225 с.
12. Ярмошенко И.В., Онищенко А.Д., Жуковский М.В. Проблемы оптимизации защиты от радона и введения референтного уровня в Российской Федерации // *Радиационная гигиена*, 2014. Т. 7. № 4. С. 67–71.
13. Wang F., Ward I.C. The development of a radon entry model for a house with a cellar // *Building and Environment*. 2000. № 35, pp. 615–631.
14. Vasilyev A.V., Yarmoshenko I.V., Zhukovsky M.V. Low air exchange rate causes high indoor radon concentration in energy-efficient buildings // *Radiation Protection Dosimetry*. 2015. № 164–4, pp. 601–605.
15. Bakaeva N.V., Kalaydo A.V. Analytical model for calculation the radon-protective characteristics of underground walling // *IOP Conference Series: Materials Science and Technology*. 2018. No. 456, 012102. doi:10.1088/1757-899X/456/1/012102
2. Darby S., Hill D., Doll R. Radon: A likely carcinogen at all exposures. *Annals of Oncology*. 2001. No. 12, pp. 1341–1351.
3. Regalis V.S. the Contribution of radon and human environment in the formation of radio-ecological situation in Moscow. *Geofizicheskij vestnik*. 2008. No. 6, pp. 14–16. (In Russian).
4. Polsky O.G., Varshavsky Yu.V., Verbov V.V. System of ensuring radiation safety of the population of the Moscow megapolis. *Medicina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2006. No. 2, pp. 4–11. (In Russian).
5. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. IAEA safety standards for the protection of people and the environment. Vienna, 2014. 471 p.
6. World Health Organization. WHO Guidelines on Indoor Radon: public Health perspectives. WHO. Geneva. 2009. 94 p.
7. Darby S., Deo H., Doll R. The Parallel analysis of individual and environmental data on domestic radon and lung cancer in the South West of England. *J R Stat Soc A*. 2001. No. 164 (1), pp. 193–203.
8. Beck T.R. Risk and radiation dose associated with household radon in Germany. *Radiation protection dosimetry*. 2017. No. 175 (4), pp. 466–472. (In Russian).
9. Radolich V., Miklavchich I., Stanich D. Identification and mapping of radon-affected areas in Croatia-preliminary results for Lika Senj and the southern part of the Karlovac counties. *Radiation protection dosimetry*. 2014. No. 162 (1–2), pp. 29–33. (In Russian).
10. MKRZ: Protection from radon-222 at home and at work. Publication of the International Commission on Radiological Protection 65. Pergamon, 1994. 89 p.
11. Radiation safety standards (NRB-99/2009): (Ionizing radiation, radiation safety SP 2.6.1.2523-09): registered on August 14, 2009. Registration number 14534. Moscow: Ministry of Justice of Russia, 2009. 225 p.
12. Yarmoshenko I.V., Onishchenko A.D., Zhukovsky M.V. Problems of optimizing radon protection and the introduction of a reference level in the Russian Federation. *Radiacionnaya gigiena*. 2014. Vol. 7. No. 4, pp. 67–71. (In Russian).
13. Wang F., Ward I.S. Development of a radon input model for a house with a basement. *Construction and Environment*. 2000. No. 35, pp. 615–631.
14. Vasiliev A.V., Yarmoshenko I.V., Zhukovsky M.V. Low air exchange rate causes a high concentration of radon in the premises of energy-efficient buildings. *Radiation protection dosimetry*. 2015. No. 164–4, pp. 601–605. (In Russian).
15. Bakaeva N.V., Kalaido A.V. Analytical model for calculating radon-protective characteristics of underground enclosing structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Technology*. 2018. No. 456, 012102. doi:10.1088/1757-899X/456/1/012102

- Materials Science and Engineering*. 2018. № 456, 012102. doi:10.1088/1757-899X/456/1/012102.
16. Diallo T., Collignan B., Allard F. 2D Semi-empirical models for predicting the entry of soil gas pollutants into buildings // *Building and Environment*. 2015. № 85, pp. 1–16.
17. Гулабянц Л.А. Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий. М.: НО «ФАН-НАУКА», 2013. 52 с.
18. Kojima H., Nagano K. Dependence of barometric pressure, wind velocity and temperature on the variation of radon exhalation // *Proceedings of the 2000 International Radon Symposium*. 2000. NJ III, pp. 6.1–6.11.
19. Andersen C E 2001 Numerical modelling of radon-222 entry into houses: an outline of techniques and results // *The Science of the Total Environment*. 2001. № 272, pp. 33–42.
20. Jiranek M., Svoboda Z. Numerical modelling as a tool for optimisation of sub-slab system design // *Building and Environment*. 2007. № 42, pp. 1994–2003.
21. Kuzina E., Cherkas A., Rimshin V. Technical aspects of using composite materials for strengthening constructions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 21, Construction – The Formation of Living Environment*. 2018. С. 032053.
22. Ларионов Е.А., Римшин В.И., Василькова Н.Т. Энергетический метод оценки устойчивости сжатых железобетонных элементов // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2012. № 2. С. 77–81.
23. Римшин В.И., Галубка А.И., Синютин А.В. Инженерный метод расчета усиления железобетонных плит покрытия композитной арматурой // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2014. № 3. С. 218–220.
24. Мосаков Б.С., Курбатов В.Л., Римшин В.И. Основы технологической механики тяжелых бетонов. Минеральные Воды: Белгородский гос. технологический ун-т им. В.Г. Шухова, Северо-Кавказский фил., 2017. 209 с.
25. Varlamov A.A., Rimshin V.I., Tverskoi S.Y. The general theory of degradation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vladivostok, 2018. С. 022028.
26. Varlamov A.A., Rimshin V.I., Tverskoi S.Y. The modulus of elasticity in the theory of degradation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vladivostok, 2018. С. 022029.
27. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Rimshin V.I. The limiting values of moments and deformations ratio in strength calculations using specified material diagrams // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vladivostok, 2018. С. 032024.
16. Diallo T., Collignan B., Allard F. 2D semi-empirical models for predicting the ingress of soil gas pollutants into buildings. *Construction and the environment*. 2015. No. 85, p. 1–16. (In Russian).
17. Gulabyants L.A. Manual on the design of anti-tornado protection of residential and public buildings. Moscow: NO “FAN-NAUKA”, 2013. 52 p.
18. Kojima H., Nagano K. Dependence of barometric pressure, wind speed and temperature on changes in radon exhalation. *Proceedings of the International Symposium on Radon 2000*. 2000. New Jersey III, pp. 6.1–6.11.
19. Andersen S.E. Numerical modeling of radon-222 penetration into homes: a brief description of methods and results. *Science of the General Environment*. 2001. No. 272, pp. 33–42. (In Russian).
20. Jiranek M., Svoboda Z. Numerical modeling as a tool for optimizing the design of overlap systems. *Construction and the environment*. 2007. No. 42, pp. 1994–2003. (In Russian).
21. Kuzina E., Cherkas A., Rimshin V. Technical aspects of the use of composite materials for strengthening structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 21, Construction – Formation of the habitat*. 2018, p. 032053.
22. Larionov E.A., Rimshin V.I., Vasilkova N.T. Energy method for assessing the stability of compressed reinforced concrete elements. *Construction mechanics of engineering structures and structures*. 2012. No. 2, pp. 77–81. (In Russian).
23. Rimshin V.I., Galubka A.I., Sinyutin A.V. An engineering method for calculating the reinforcement of reinforced concrete slabs with composite reinforcement. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. 2014. No. 3, pp. 218–220. (In Russian).
24. Mosakov B.S., Kurbatov V.L., Rimshin V.I. Osnovy tekhnologicheskoy mekhaniki tyazhelyh betonov [Fundamentals of technological mechanics of heavy concrete]. Mineralnye Vody: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, North Caucasus Phil., 2017. 209 p.
25. Varlamov A.A., Rimshin V.I., Tverskoy S.Yu. General theory of degradation. *IOP Conference series: Materials Science and Technology*. Vladivostok. 2018, p. 022028.
26. Varlamov A.A., Rimshin V.I., Tverskoy S.Yu. Modulus of elasticity in the theory of degradation. *IOP Conference series: Materials Science and Technology*. Vladivostok. 2018, p. 022029
27. Karpenko N.I., Yeryshev V.A., Rimshin V.I. Limiting values of the ratio of moments and deformations in strength calculations using specified diagrams of materials. *IOP Conference series: Materials Science and Engineering*. Vladivostok. 2018, p. 032024.