

Научная статья  
УДК 69;539.1.075  
<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-1/86-95>

## Радиоактивные изотопы в воздухе рабочей зоны производственных зданий и сооружений

Владимир Иванович Римшин<sup>1,3✉</sup>, Александр Витальевич Калайдо<sup>2,3</sup>,  
Мария Николаевна Семенова<sup>3</sup>, Григорий Сергеевич Быков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

<sup>2</sup> Луганский государственный педагогический университет, Луганск, Россия

<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, Москва, Россия

✉ [v.rimshin@niisf.ru](mailto:v.rimshin@niisf.ru)

**Аннотация.** Дана характеристика источников радиоактивного газа радона, неизменно присутствующего в воздушной среде рабочей зоны. Выявлены особенности формирования радоновой обстановки в производственных и служебных помещениях и предложена методика прогнозирования уровней радона в них. На основании уравнения радонового баланса показана возможность существенного снижения дозы внутреннего облучения работников радоном посредством рациональной организации воздухообмена в помещении. Предложен подход автоматизация к экспериментальному определению кратности воздухообмена при одновременном измерении объемной активности и эквивалентной равновесной объемной активности радона в воздухе рабочей зоны.

**Ключевые слова:** радон, источник, радиация, доза облучения, потомство, профессиональные риски, автоматизация.

**Для цитирования:** Римшин В.И., Калайдо А.В., Семенова М.Н., Быков Г.С. Радиоактивные изотопы в воздухе рабочей зоны производственных зданий и сооружений // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 1(58). С. 86–95.

Original article

## Radioactive isotopes in the air of the working area of industrial buildings and structures

Vladimir I. Rimshin<sup>1,3✉</sup>, Alexander V. Kalaido<sup>2,3</sup>, Maria N. Semenova<sup>3</sup>, Grigory S. Bykov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Lugansk State Pedagogical University, Lugansk, Russia

<sup>3</sup> Scientific Research Institute of Building Physics RAACS, Moscow, Russia

✉ [v.rimshin@niisf.ru](mailto:v.rimshin@niisf.ru)

**Abstract.** Are given the characteristics of the sources of radioactive radon gas, which is invariably present in the working area air. Features of the radon situation formation in working and office premises have been identified and a methodology for predicting radon levels in them has been proposed. Based on the radon balance equation, the possibility of significantly reducing the dose of indoor radon exposure due to the rational organization of air exchange in the room is shown. An approach is proposed to experimentally determine the air exchange rate through simultaneous measurement of radon concentration and equivalent equilibrium radon progeny concentration in the air of the working area.

**Keywords:** radon, source, radiation, radiation dose, progeny, occupational risks, automation

**For citation:** Rimshin V.I., Kalaido A.V., Semenova M.N., Bykov G.S. Radioactive isotopes in the air of the working area of industrial buildings and structures. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 1(58), pp. 86–95. (In Russ.).

## Введение

Согласно Указу Президента Российской Федерации от 02.07.2021 № 400 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации» цифровизация, использование технологий искусственного интеллекта являются важными средствами повышения производительности труда, которые способствуют модернизации промышленных предприятий, инфраструктуры и созданию высокотехнологичных рабочих мест.

Цифровизация активно проникла во все сферы общественной жизни, включая строительство. Широкое применение информационных технологий в производстве, при выполнении работ и оказании услуг различного характера затрагивает как непосредственно трудовые отношения, так и иные, тесно с ними связанные, среди которых следует выделить отношения по организации труда. Внедрение новых информационных технологий в указанные процессы подразумевает изменение трудовых функций многих работников и условий их труда. Исследованиям в области радиационной безопасности были посвящены научные работы, отмеченные в российской научной печати [1–16], а также в зарубежных источниках [17–18].

Непрерывно совершенствующиеся информационные технологии позволяют все больше возлагать на сотрудников достаточно сложные обязанности, не сомневаясь в качестве их выполнения. В свою очередь, работники, исполняя свои обязанности с применением специальных компьютерных приложений, рядом с робототехникой, а зачастую даже находясь под управлением систем с элементами искусственного интеллекта, включаются в «цифровую среду» работодателя, становятся особым ее элементом. Некоторые работодатели даже начинают процесс формирования «цифрового профиля» работника, включающего в себя набор классифицированных данных, создаваемый путем автоматизированной обработки информации, полученной с помощью средств контроля за выполнением работником трудовой функции, анализа его поведения. Целью подобных мероприятий является не только повышение производительности труда в конкретной организации, но и соблюдение требований охраны труда, снижение уровней профессиональных рисков.

Информационные технологии помогают работодателю поддерживать дисциплину, используя различное программное обеспечение, позволяющее осуществлять непрерывное наблюдение за сотрудниками во время работы, автоматически обрабатывать информацию о количестве и качестве выполненной работы, месте нахождения работника, рациональном использовании ресурсов и имущества работодателя.

## Материалы и методы

По современным представлениям, любая человеческая деятельность, в том числе и трудовая, потенциально опасна. Это связано с действием широкого спектра вредных и/или опасных производственных факторов физической, химической, биологической и психофизиологической природы.

В современном постиндустриальном обществе, с его высоким уровнем развития техники и технологий, именно физические факторы образуют наибольшую группу производственных опасностей, неизменно сопровождающих рабочий процесс во всех без исключения отраслях народного хозяйства. И наибольшую угрозу из данной группы факторов представляют ионизирующие излучения рабочей зоны – радиация.

Вопросы радиационной безопасности рабочих мест традиционно ассоциируются с предприятиями ядерно-топливного цикла и профессиями, регулярно эксплуатирующими источники ионизирующего излучения в силу специфики производственной деятельности. Действительно, работники данных профессий потенциально подвержены риску повышенного облучения, и для недопущения подобной ситуации Нормами радиационной безопасности<sup>3</sup> предусмотрено отнесение их к категориям А и В по величине облучения с установлением предельно допустимых доз.

<sup>3</sup> СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 июля 2009 г. № 47).

Но как ни парадоксально, наибольшие годовые индивидуальные дозы облучения в производственных условиях получает не персонал радиационно-опасных объектов, на которых реализуется непрерывный дозиметрический контроль, а работники предприятий, никак не связанных с использованием источников ионизирующего излучения. Это вызвано следующими причинами:

- основным дозообразующим фактором на территории Российской Федерации (как и в большинстве других стран) является радон и его дочерние продукты распада (ДПР) в воздухе помещений;

- на этих предприятиях не производится систематический дозиметрический контроль. «Мишенью» неблагоприятного воздействия радона и его ДПР являются органы дыхания, длительное нахождение в помещениях с высоким содержанием радона увеличивает риск возникновения рака легкого. При этом негативный эффект от радоновой экспозиции существенно увеличивается в сочетании с курением.

Радон – благородный радиоактивный газ без цвета и запаха, который образуется во всех радиоактивных семействах из радия. В природе встречаются три естественных изотопа:  $^{222}\text{Rn}$  (радон),  $^{220}\text{Rn}$  (торон) и  $^{219}\text{Rn}$  (актинон), но для воздуха рабочей зоны опасность представляет только основной изотоп радон-222. Он имеет достаточно большой период полураспада (3,82 сут.), что позволяет ему мигрировать на значительные расстояния и, преодолевая подземную оболочку зданий, накапливаться в воздухе помещений в опасных концентрациях.

Обеспечение благоприятного радиационного микроклимата помещений с длительным пребыванием людей возможно только на основе понимания основных источников поступления радона в здания и их роли в формировании внутренней радоновой обстановки. Установлено, что радон не только поступает в здания извне, но и образуется непосредственно в них:

- внутренним источником генерации радона является его выделение из материалов наружных и внутренних ограждающих конструкций (стен, потолка и пола), которые всегда содержат радий;

- внешним источником является поступление радона из грунта сквозь подземную оболочку здания;

- в ряде случаев источниками радона могут выступать системы водо- и газоснабжения, однако для этого требуется реализация некоторых специфических условий, не характерных для селитебных территорий.

Поступивший в здание радон непосредственно практически не наносит вреда органам дыхания человека, но в процессе его радиоактивного распада образует короткоживущие ДПР – полоний-218, свинец-214 и висмут-214, на которые и приходится около 90% дозы внутреннего облучения человека. Присутствие радона в воздухе рабочей зоны неизменно означает и присутствие всех его короткоживущих ДПР.

Содержание радона и его ДПР в воздухе помещений в РФ характеризуется эквивалентной равновесной объемной активностью (ЭРОА) трех короткоживущих ДПР радона, которая измеряется в беккерелях на метр кубический ( $\text{Бк}/\text{м}^3$ ) и является нормируемой величиной. Санитарным законодательством РФ установлено предельное допустимое среднегодовое значение ЭРОА радона в воздухе жилых и общественных зданий:

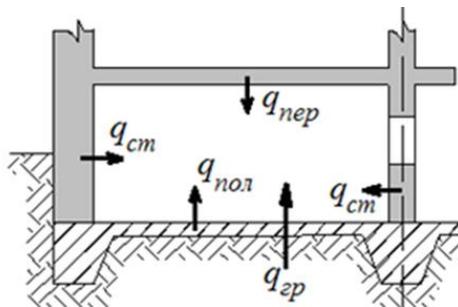
- $100 \text{ Бк}/\text{м}^3$  в строящихся и реконструируемых зданиях, а также в зданиях, построенных по современным технологиям;

- $200 \text{ Бк}/\text{м}^3$  в эксплуатируемых зданиях, построенных до 1991 г.

Однако в соответствии с действующей линейной беспороговой концепцией любое облучение сверх природного радиационного фона вызывает пропорциональный по величине рост вероятности возникновения онкологических заболеваний. Поэтому уровень в  $100 \text{ Бк}/\text{м}^3$  не является безусловно безопасным и при нынешнем уровне развития строительных технологий реально обеспечение значений ЭРОА не более 40–60  $\text{Бк}/\text{м}^3$ .

Не все производственные помещения одинаково радоноопасны, уровни радона в них зависят от конструктивных особенностей и режима эксплуатации здания. Чаще всего макси-

мальные значения ЭРОА характерны для одноэтажных строений с большой площадью контакта с грунтовым основанием (грунтовой радон) и/или для зданий с малой площадью светопрозрачных ограждающих конструкций (вклад эманирования). В большинстве случаев максимальные значения ЭРОА имеют место на нижнем этаже здания, что показывает расчетная схема поступления радона в помещение нижнего этажа (рис. 1).



**Рис. 1. Расчетная схема поступления радона в помещение нижнего этажа**  
 Fig. 1. Calculation scheme of radon intake into the room of the lower floor

Прогнозирование уровней радона на рабочих местах может быть выполнено с помощью уравнения радонового баланса, учитывающего все источники и стоки активности:

$$\text{ЭРОА}_{\text{нр}} = \frac{q_{\text{cm}} \cdot S_{\text{cm}} + q_{\text{nep}} \cdot S_{\text{nep}} + (q_{\text{erp}} + q_{\text{nol}}) \cdot S_{\text{nol}}}{V \cdot (\lambda + n)} \cdot F, \quad (1)$$

где  $q_{\text{cm}}$ ,  $q_{\text{nep}}$  и  $q_{\text{nol}}$  – плотности потока радона с поверхности стен, перекрытия и пола, Бк/(м<sup>2</sup>·с);

$q_{\text{erp}}$  – плотность потока радона из грунта сквозь подземную оболочку здания, Бк/(м<sup>2</sup>·с);

$S_{\text{cm}}$ ,  $S_{\text{nep}}$  и  $S_{\text{nol}}$  – площади поверхности стен, перекрытия и пола, м<sup>2</sup>;

$V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;

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

$n$  – кратность воздухообмена в помещении, с<sup>-1</sup>;

$F$  – безразмерный коэффициент сдвига радиоактивного равновесия.

Зависимости для определения плотности потока радона (ППР) с поверхностями ограждающих конструкций имеют следующий вид:

– ППР с поверхности стен:

$$q_{\text{cm}} = C_{\text{Ra}} \cdot \rho_{\text{б}} \cdot k_{\text{эм}} \cdot \sqrt{\lambda \cdot D_{\text{б}}} \cdot \tanh\left(\frac{h_{\text{cm}}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{D_{\text{б}}}}\right); \quad (2)$$

– ППР с поверхности перекрытия:

$$q_{\text{nep}} = C_{\text{Ra}} \cdot \rho_{\text{б}} \cdot k_{\text{эм}} \cdot \sqrt{\lambda \cdot D_{\text{б}}} \cdot \tanh\left(\frac{h_{\text{nep}}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{D_{\text{б}}}}\right); \quad (3)$$

– ППР с поверхности плиты пола:

$$q_{\text{nol}} = C_{\text{Ra}} \cdot \rho_{\text{б}} \cdot k_{\text{эм}} \cdot \sqrt{\lambda \cdot D_{\text{б}}} \cdot \tanh\left(\frac{h_{\text{nol}}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{D_{\text{б}}}}\right), \quad (4)$$

где  $C_{\text{Ra}}$  – удельная активность радия в бетоне;

$\rho_{\text{б}} = 2400 \text{ кг/м}^3$  – плотность бетона;

$k_{\text{эм}}$  – коэффициент эманирования радона материалом ограждающих конструкций;

$h_{\text{cm}}$ ,  $h_{\text{nep}}$  и  $h_{\text{nol}}$  – толщина стен, плиты перекрытия и пола, м;

$D_{\text{б}}$  – коэффициент диффузии радона в бетоне, м<sup>2</sup>/с.

Представим значения коэффициента эманирования радона строительными материалами (табл. 1) и коэффициента диффузии радона в бетоне (табл. 2).

Таблица / Table 1

**Коэффициенты эманирования радона в стройматериалах**  
Radon emission coefficients in building materials

Материал	$k_{эм}$
Бетон тяжелый	0,11
Кирпич красный	0,015
Кирпич силикатный	0,10
Гипс строительный	0,044
Туф	0,014

Таблица / Table 2

**Коэффициент диффузии радона в бетоне**  
Radon diffusion coefficient in concrete

Материал	Толщина слоя, мм	$D, м^2/с$
Бетон по ГОСТ 26633-91 класса не ниже В20 на цементном связующем и тяжелом заполнителе, армированный	100	$1,1 \cdot 10^{-7}$
	150	$7,5 \cdot 10^{-8}$
	200	$5,3 \cdot 10^{-8}$
	250	$3,7 \cdot 10^{-8}$
	300	$2,9 \cdot 10^{-8}$
	350	$2,4 \cdot 10^{-8}$
	400	$2,0 \cdot 10^{-8}$
	450	$1,8 \cdot 10^{-8}$
	500	$1,7 \cdot 10^{-8}$
	550	$1,6 \cdot 10^{-8}$
	$\geq 600$	$1,5 \cdot 10^{-8}$

Определение плотности потока радона из грунта сквозь подземную оболочку здания производится по формуле

$$q_{гр} = \frac{C_{гр} \cdot \rho_{гр} \cdot k_{гр} \cdot \sqrt{\lambda \cdot D_{б}}}{sh \left( h_{пл} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{D_{б}}} \right)}, \tag{5}$$

где  $C_{гр}$  – удельная активность радия в грунте, Бк/кг;  
 $\rho_{гр}$  – плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;  
 $k_{гр}$  – коэффициент эманирования радона грунтом (табл. 3).

Таблица / Table 3

**Коэффициенты эманирования радона в грунтах**  
Radon emission coefficients in soils

Тип породы	$k_{эм}$
Глины	0,45...0,60
Пески аллювиальные	0,45
Суглинки моренные	0,35
Мергели четвертичные	0,60
Известняки каменноугольного периода	0,20
Песчаники среднеюрского периода	0,10
Пески пылеватые и глинистые	0,15
Конгломераты	0,15

Величина коэффициента сдвига радиоактивного равновесия  $F$ , характеризующего скорость удаления ДПР радона из воздуха рабочей зоны, в режиме реальных условий эксплуатации зданий лежит в пределах от 0,2 до 0,8. Если же она не определена экспериментально, то рекомендациями Международной комиссии по радиационной защите предлагается в расчетах использовать значение  $F = 0,4$ .

Таким образом, подстановка выражений (2)–(5) в уравнение (1) позволяет прийти к выражению

$$ЭРОА_{np} = f(n).$$

Подставляя кратность воздухообмена, установленную санитарным законодательством для данного типа помещений, можно получить прогнозируемое значение ЭРОА продуктов распада радона в воздухе рабочей зоны. Если полученное значение ЭРОА близко по величине или превышает 100 Бк/м<sup>3</sup>, то проведение радиационного мониторинга рабочих мест следует признать необходимым.

В соответствии с предложенным алгоритмом был выполнен расчет прогнозируемого ЭРОА радона для лаборатории, имеющей следующие размеры: длина  $a = 9$  м; ширина  $b = 5,5$  м; высота  $h = 3,2$  м; толщина стен  $h_{cm} = 0,55$  м; суммарная площадь дверей  $S_{дв} = 4,5$  м<sup>2</sup>; суммарная площадь окон  $S_{ок} = 6,5$  м<sup>2</sup>; толщина плиты основания  $h_{пл} = 0,25$  м и толщина перекрытия  $h_{пер} = 0,15$  м. Расчет производился для трех наиболее типичных удельных активностей радия в грунте под зданием  $C_{gp} = 20, 30$  и  $40$  Бк/кг при содержании радия в материалах ограждающих конструкций  $C_{Ra} = 20$  Бк/кг (табл. 4). Результаты расчета показывают ключевую роль воздухообмена в формировании уровней радона в здании. Даже при минимальной кратности воздухообмена  $n = 0,1$  ч<sup>-1</sup> ЭРОА радона уменьшается более чем в 10 раз по сравнению с «закрытым» помещением.

Таблица / Table 4

**Результаты численного исследования зависимости ЭРОА радона (Бк/м<sup>3</sup>) в помещении нижнего этажа от кратности воздухообмена**  
 The results of a numerical study of the dependence of radon ERO (Bq/m<sup>3</sup>) in a lower floor room on the multiplicity of air exchange

Кратность воздухообмена $n$ , ч <sup>-1</sup>	0	0,1	0,2	0,3	0,4
$C_{gp1} = 20$ Бк/кг	1 810	128	67	47	36
$C_{gp2} = 30$ Бк/кг	1 979	140	73	51	39
$C_{gp3} = 40$ Бк/кг	2 148	152	80	55	42

Содержание радона в воздухе помещений может быть определено не только через ЭРОА его дочерних продуктов распада. В зарубежных странах количественной характеристикой выступает *объемная активность* (ОА) самого радона, также измеряемая в Бк/м<sup>3</sup>. При этом обе нормируемые величины связаны между собой через все тот же коэффициент сдвига радиоактивного равновесия:

$$ЭРОА = ОА \cdot F.$$

Как отмечалось выше, коэффициент  $F$  характеризует скорость удаления ДПР радона из воздуха рабочей зоны и теоретически может принимать значения от 0 до 1. Из-за сложности вычислений его обычно определяют экспериментальным путем при одновременном измерении ЭРОА и ОА. В то же время была предложена следующая зависимость коэффициента сдвига радиоактивного равновесия от кратности воздухообмена в помещении:

$$F = 0,9784 - 0,7093n + 0,3491n^2 - 0,125n^3 + 0,0158n^4 - 0,001n^5. \tag{6}$$

Современные отечественные аэрозольные радиометры радона «АльфаАэро» и «Альфа-рад» позволяют измерять экспресс-методом значения ЭРОА и ОА в помещении, поэтому радиоактивный газ радон может быть использован для определения кратности воздухообмена. Данный подход представляет особый интерес ввиду сложности натурального определения кратности воздухообмена в помещении и простоты вычисления корней уравнения (6) в системе компьютерной алгебры Mathcad.

Так как функция  $F(n)$  в (6) является полиномом, то все его корни можно определить, используя встроенную функцию  $\text{polyroots}(v)$ , где  $v$  – вектор, составленный из коэффициентов полинома при степенях  $n$  в возрастающем порядке (рис. 2).

$$v := \begin{pmatrix} 0.9784 \\ -0.7093 \\ 0.3491 \\ -0.125 \\ 0.0158 \\ -0.001 \end{pmatrix} \quad \text{polyroots}(v) = \begin{pmatrix} 0.385 + 2.253i \\ 0.385 - 2.253i \\ 2.407 \\ 6.312 - 6.163i \\ 6.312 + 6.163i \end{pmatrix}$$

**Рис. 2. Пример вычисления корней уравнения (6) в Mathcad**  
 Fig. 2. An example of calculating the roots of equation (6) in Mathcad

Безусловно, уравнение (6) только приблизительно описывает связь коэффициента сдвига  $F$  с кратностью воздухообмена  $n$ , так как в реальных условиях удаление ДПР радона происходит еще и за счет их осаждения на различных поверхностях. На рис. 2 показано вычисление кратности воздухообмена ( $n = 2,407$ ), при которой из рабочей зоны полностью удаляются все ДПР радона ( $F = 0$ ), чего вряд ли можно ожидать в реальных условиях. Однако при меньших кратностях воздухообмена ( $n \leq 1$ ) корректность выражения (6) растет, что позволяет использовать радиационные измерения для оценки кратности воздухообмена в производственных и служебных помещениях.

### Заключение

Таким образом, по результатам данного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Большая часть производственной дозы радиоактивного облучения населения Российской Федерации формируется радоном и его дочерними продуктами распада на предприятиях, не связанных с использованием источников ионизирующего излучения.
2. Воздухообмен играет важную роль в радоновом балансе здания, поэтому регулирование концентрации радона в помещении на основе оптимального управления кратностью воздухообмена является наиболее эффективным средством снижения риска возникновения рака легкого.
3. Радиоактивный газ радон, неизменно присутствующий в зданиях, теоретически может служить рабочим веществом для определения кратности воздухообмена в натуральных условиях. Однако данный подход изучен недостаточно и требует дальнейших исследований.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голованцев С.М. Радон и канцерогенный риск в Москве // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 1. С. 16–22. EDN: UNTWPB
2. Гулябянц Л.А. Моделирование радонового режима здания // Аппаратура и новости радиационных измерений. 2008. № 2(53). С. 52–55.
3. Гулябянц Л.А., Цапалов А.А. Радонопроницаемость тяжелого бетона // Жилищное строительство. 2011. № 1. С. 39–41. EDN: NQUBUT

4. Жуковский М.В., Кружалов А.В., Гурвич В.Б., Ярмошенко И.В. Радоновая безопасность зданий. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000. 180 с.
5. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В. Радон: измерение, дозы, оценка риска. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1997. 232 с.
6. Калайдо А.В., Римшин В.И., Семенова М.Н., Быков Г.С. Анализ зарубежного опыта обеспечения радоновой безопасности эксплуатируемых зданий (на примере США) // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 4, № 10. С. 54–58. EDN: WGHUBP
7. Калайдо А.В., Римшин В.И., Семенова М.Н., Быков Г.С. Пассивные технологии обеспечения радоновой безопасности воздушной среды проектируемых зданий // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 1(17). С. 28–35. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2021.1.28>
8. Кормановская Т.А., Ахматдинов Р.Р., Горский Г.А. Итоги 20 лет функционирования Федерального банка данных по дозам природного облучения населения Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 112–125. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-3-112-125>
9. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 119 с.
10. Посохин В.Н. О расчете воздухообмена // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2014. № 4(148). С. 84–88. EDN: TWQWRN
11. Прозаровская М.А., Панитков О.И. Влияние кратности воздухообмена на эксплуатационные характеристики на примере «Активного дома» // Современные наукоемкие технологии. 2012. № 10. С. 70–73. EDN: PKSXQH
12. Римшин В.И., Кришан А.Л., Мухаметзянов А.И. Построение диаграммы деформирования одноосно сжатого бетона // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 23–31. EDN: TYCWVB
13. Римшин В.И., Калайдо А.В., Семенова М.Н., Давыскиба О.В. Подземные ограждающие конструкции по критериям радоновой безопасности здания // Жилищное строительство. 2023. № 7. С. 40–46. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-33-38>
14. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. и др. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия / под ред. Г.Г. Онищенко, А.Ю. Поповой. Санкт-Петербург: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. 432 с.
15. Химическая энциклопедия / под ред. И.Л. Кнунянц и др. Москва: Советская энциклопедия, 1995. Т. 4. ПОЛ–ТРИ. 641 с.
16. Ярмошенко И.В. Радон как фактор облучения населения России // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2017. № 2(18). С. 108–116. EDN: YUDIII
17. Darby S., Hill D., Auvinen A. et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies // British Medical Journal. 2005. № 330. P. 223–227. <https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63>
18. Darby S., Hill D., Doil R. Radon: A likely carcinogen at all exposures // Annals of Oncology. 2001. № 12. P. 1341–1351. URL: [https://www.annalsofoncology.org/article/S0923-7534\(19\)54325-3/pdf](https://www.annalsofoncology.org/article/S0923-7534(19)54325-3/pdf) (дата обращения: 29.01.2024).

## REFERENCES

1. Golovantsev S.M. Radon and carcinogenic risk in Moscow. *Radiation Hygiene*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 16–22. (In Russ.).
2. Gulabyants L.A. Modeling of the radon regime of a building. *Apparatura i novosti radiatsionnykh izmereniy*, 2008, no. 2(53), pp. 52–55. (In Russ.).
3. Gulabyants L.A., Gulabyants L.A., Tsapalov A.A. Radon permeability of heavy concrete. *Housing Construction*, 2011, no. 1, pp. 39–41. (In Russ.).
4. Zhukovsky M.V., Kruzhalov A.V., Gurchich V.B., Yarmoshenko I.V. Radon safety of building. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000. 180 p. (In Russ.).
5. Zhukovsky M.V., Yarmoshenko I.V. Radon: measurement, doses, risk assessment. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1997. 232 p. (In Russ.).
6. Kalaido A.V., Rimshin V.I., Semenova M.N., Bykov G.S. Analysis of foreign experience in ensuring

- radon safety of operated buildings (on the example of the United States of America). *Bulletin of Volgoda State University. Series Technical Sciences*, 2022, vol. 4, no. 10, pp. 54–58. (In Russ.).
7. Kalaido A.V., Rimshin V.I., Semenova M.N., Bykov G.S. Passive technologies for ensuring radon safety of the indoor air environment in designed buildings. *Vestnik of Volga State University of technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*, 2021, no. 1(17), pp. 28–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2021.1.28>
  8. Kormanovskaya T.A., Akhmatdinov R.R., Gorsky G.A. Results of the 20-year period of functioning of the Federal Databank on the natural radiation doses to the population of the Russian Federation. *Radiation Hygiene*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 112–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-3-112-125>
  9. Krisyuk E.M. The radiation background of the premises. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 119 p. (In Russ.).
  10. Posokhin V.N. On the calculation of air exchange. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*, 2014, no. 4(148), pp. 84–88. (In Russ.).
  11. Prozarovskaya M.A., Panitkov O.I. The influence of air exchange multiplicity on operational characteristics on the example of an “Active house”. *Modern high technologies*, 2012, no. 10, pp. 70–73. (In Russ.).
  12. Rimshin V.I., Krishan A.L., Mukhametzyanov A.I. Constructing a deformation diagram of uniaxially compressed concrete. *Vestnik MGSU*, 2015, no. 6, pp. 23–31. (In Russ.).
  13. Rimshin V.I., Kalaido A.V., Semenova M.N., Davyskiba O.V. Calculation of underground walling according to the criteria of a building radon safety. *Housing Construction*, 2023, no. 7, pp. 40–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-7-40-46>
  14. Romanovich I.K., Stamat I.P., Kormanovskaya T.A., Kononenko D.V. et al. Natural sources of ionizing radiation: radiation doses, radiation risks, preventive measures. Eds. G. Onishchenko, A. Popova. Saint Petersburg, P. Ramzaev Federal State Budgetary Research Institute, 2018. 432 p. (In Russ.).
  15. Knunyants I. et al. (ed.). Chemical Encyclopedia. Moscow, Soviet Encyclopedia Publ., 1995. Vol. 4. POL–TRI. 639 p. (In Russ.).
  16. Yarmoshenko I.V. Radon as a factor of population exposure in Russia. *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii*, 2017, no. 2(18), pp. 108–116. (In Russ.).
  17. Darby S., Hill D., Auvinen A. et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal*, 2005, no. 330, pp. 223–227. <https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63>
  18. Darby S., Hill D., Doil R. Radon: A likely carcinogen at all exposures. *Annals of Oncology*, 2001, no. 12, pp. 1341–1351. URL: [https://www.annalsofoncology.org/article/S0923-7534\(19\)54325-3/pdf](https://www.annalsofoncology.org/article/S0923-7534(19)54325-3/pdf) (accessed: January 29, 2024).

### Информация об авторах

**Римшин Владимир Иванович** – доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (г. Москва, Россия), v.rimshin@niisf.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9084-4105>

**Калайдо Александр Витальевич** – кандидат технических наук, Луганский государственный педагогический университет, (г. Луганск, Россия); Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (г. Москва, Россия), kalaydo18@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3420-8905>

**Семенова Мария Николаевна** – ведущий инженер, Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (г. Москва, Россия), lor267gg@yandex.ru

**Быков Григорий Сергеевич** – ведущий инженер, Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (г. Москва, Россия), admin.nex@gmail.com

### Information about the authors

**Vladimir I. Rimshin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering; Scientific Research Institute of Building Physics RAACS (Moscow, Russia), v.rimshin@niisf.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9084-4105>

**Aleksander V. Kalaydo**, Candidate of Engineering Sciences, Lugansk State Pedagogical University (Lugansk, Russia); Scientific Research Institute of Building Physics RAACS (Moscow, Russia), kalaydo18@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3420-8905>

**Mariya N. Semenova**, Leading Engineer, Scientific Research Institute of Building Physics RAACS (Moscow, Russia), lor267gg@yandex.ru

**Grigory S. Bykov**, Leading Engineer, Scientific Research Institute of Building Physics RAACS (Moscow, Russia), admin.nex@gmail.com

#### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 21.12.2023; одобрена после рецензирования 16.01.2024; принята к публикации 20.03.2024.

#### **Information about the article**

The article was submitted: December 21, 2023; approved after reviewing: January 16, 2024; accepted for publication: March 20, 2024.