

УДК 614.876+699.88

О. П. Сидельникова

Волгоградский государственный технический университет

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДОНОБЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ

Статья посвящена исследованию динамики накопления радона в воздухе помещений нижних этажей зданий, построенных из различных строительных материалов. Результаты выполненных практических и теоретических работ позволили определить пути поступления радона в здания, места его скопления и перемещения. Показано, что радоновую обстановку в здании формируют два процесса — поступление радона из грунтового основания и его эмансирование из материалов ограждающих конструкций, а доминирующий процесс определяется совокупностью физико-механических характеристик грунта и особенностями конструкции подземной оболочки здания. Широкое использование современных технологий, направленных на снижение тепловых потерь, неизменно сопровождается уменьшением кратности воздухообмена. Это приводит к ухудшению качества воздуха в зданиях и увеличению концентрации радона. Накопление радона в высокоэффективных зданиях способствует увеличению радоновых нагрузок на население и определяется режимом эксплуатации помещения.

К л ю ч е в ы е с л о в а: радон, дочерние продукты распада, принцип оптимизации, референтный уровень, эквивалентная равновесная объемная активность, естественные радионуклиды, строительные материалы, энергоэффективность здания, кратность воздухообмена.

Современный этап развития научно-технического прогресса характеризуется ростом количества ионизирующего излучения техногенного характера, которые создают повышенный радиационный фон.

В настоящее время базовые принципы радиационной безопасности определяются «Публикацией 103» Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) [1]. Адаптация к новым рекомендациям МКРЗ базируется на рассмотрении различных вариантов ситуаций облучения, где центральная роль придается принципу оптимизации и референтным уровням.

Облучение населения радоном относится, как правило, к ситуации существующего облучения, поскольку его источником являются концентрации естественных радионуклидов земной коры. Техногенная деятельность человека может изменять или создавать пути поступления радона, вследствие чего повышаются объемные активности (ОА) внутри помещений. Очевидно, что этими путями необходимо управлять с помощью корректирующих или предупредительных мер.

По мнению МКРЗ и ВОЗ, подход, при котором меры по снижению ОА радона рекомендовались только в случае превышения установленного уровня действия, создавал неверное представление, что воздействие ниже этого уровня является безопасным [2—4].

Важным элементом современной стратегии регулирования радоновой проблемы является изменение смысла нормируемой величины, переходя от уровня действия к референтному уровню.

Референтный уровень (РУ) представляет собой уровень дозы, риска или концентрации радионуклидов, допущение превышения которого при планировании считается неприемлемым, а ниже которого должна осуществляться оптимизация защиты. Следствием использования понятия РУ вместо понятия

уровня действия является то, что оптимизация должна применяться как оправданная мера выше и ниже РУ, а не только когда он превышает.

В зданиях (при отсутствии искусственных источников) посетители подвергаются воздействию технологически измененного естественного радиационного фона, обусловленного природными источниками ионизирующего излучения: космическим излучением и естественными радионуклидами (ЕРН), содержащимися в грунте, на котором возведено здание, в строительных материалах, из которых изготовлены ограждающие конструкции, а также поступающими в помещение вместе с воздухом, водой и в результате сгорания топлива.

Во многих развитых странах мира обнаружены высокие уровни облучения населения в дозах, значительно превышающих допустимые, вследствие использования строительных материалов с повышенным содержанием ЕРН и дочерних продуктов распада (ДПР) радона, накапливающихся в воздухе помещений [5].

Целью государственной политики в области обеспечения радиационной безопасности являются последовательное снижение до приемлемого уровня техногенного воздействия на население и окружающую среду радиационного фактора и снижение до допустимых норм воздействия природных источников ионизирующего излучения.

Одним из отрицательных экологических последствий интенсификации развития промышленности, происходившей во второй половине XX столетия, явилось увеличение техногенного радиационного фона в результате перемещения в процессе производственной деятельности огромного количества природных радионуклидов (уран, торий и продукты их распада), что привело к изменению радиационного воздействия на человека. Уровень концентрации этих радионуклидов на земной поверхности резко возрос в связи с извлечением полезных ископаемых из недр и их последующей переработкой [6].

Основная идея реализации современной радоновой политики определяется не только снижением индивидуальных рисков от радона для наиболее облучаемых лиц, но и последовательным снижением общего коллективного риска для населения.

Контролируемость облучения радоном лежит в основе регулирования ситуации с облучением, разработка стратегии и тактики которого является предметом рекомендаций и требований авторитетных международных организаций по радиационной безопасности [7].

Радон (^{222}Rn) является природным источником радиоактивного излучения, представляет собой одноатомный радиоактивный газ, который не имеет стабильных изотопов и образуется в геологической среде в результате распада радия (^{226}Ra). Радон присутствует в трех радиоактивных семействах:

- ряд урана ^{238}U , конечным продуктом которого является стабильный изотоп свинца ^{206}Pb ;
- ряд тория ^{232}Th , конечным продуктом которого является стабильный изотоп свинца ^{208}Pb ;
- ряд урана ^{235}U , конечным продуктом его является стабильный изотоп свинца ^{207}Pb .

Наибольший вклад в дозовые нагрузки населения и вред для здоровья вносит родительский изотоп радона ^{222}Rn , который имеет период полураспада

да $T_{1/2} = 3,8$ сут. И, как следствие, радон может мигрировать на значительные расстояния от места образования.

Изотопы ^{220}Rn (торон) и ^{219}Rn (актинон) имеют период полураспада значительно меньше, чем ^{222}Rn . Период полураспада ^{220}Rn составляет 55,6 с, а период полураспада ^{219}Rn — 3,96 с, что является малосущественным при оценке степени радоновой опасности. Именно на долю ^{222}Rn приходится почти вся доза (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po), при этом доля «чистого» радона — не более 2 %.

Радон относится к канцерогенам первой группы, не имеет цвета, запаха и вкуса. Радон и его ДПР приводят к облучению внутренних органов, увеличивая риски рака легких, лейкемии, рака мозга. Совместно эти факторы оказывают мультипликативный эффект, ущерб от их совместного воздействия в разы превышает количество ущерба, нанесенного в отдельности каждым фактором. Вероятность заболевания определяется продолжительностью и интенсивностью воздействия, а также состоянием здоровья человека, подвергнувшегося облучению [8].

В воздухе любого здания радон присутствует всегда. ОА радона в атмосферном воздухе составляет около 10 Бк/м³. ОА радона в воздухе помещений обычно выше, чем в воздухе вне зданий. Изменение ОА радона обусловлено следующими причинами:

- присутствие источника радона в самом здании или возле него;
- наличие путей поступления радона в здание;
- наличие побудительных сил, перемещающих радон в здание;
- присутствие путей миграции радона от источника радона к зданию.

Основным источником радона является территория застройки — горные породы, на которых расположены здания. ОА радона в почвенном воздухе обычно достигает десятки и сотни кБк/м³. Активность радона на поверхности грунта может возрасти, если под зданием расположены рудные образования, содержащие радий.

При проведении инженерных изысканий определяют параметры потенциальной радоновой опасности участков застройки. Кроме того, источником радона в воздухе помещений являются строительные материалы, из которых возведено здание. При определенных условиях эманирование радона из строительных конструкций также может являться значимым фактором формирования радоновой обстановки в здании. Из горных пород под зданием, строительных материалов радон перемещается по порам и трещинам. Эти процессы определяются тремя механизмами:

- диффузионным, возникающим из-за градиента концентраций радона в среде (скорость переноса радона в основном определяется значением коэффициента диффузии радона в среде);
- конвективным, вызванным разностью давлений между внутренним объемом здания и внешней атмосферой;
- смешанным (конвективно-диффузионным), с преобладающим вкладом одного из механизмов и существенным вкладом другого [9].

В воздухе помещений смесь ДПР радона постоянно находится в изменяющемся неравновесном состоянии. Для оценки опасности загрязнения помещений радоном введено понятие эквивалентной *равновесной объемной активности* (ЭРОА) радона. ЭРОА радона — значение объемной удельной ак-

тивности радона в равновесии с ДПР, которые имели бы такую же потенциальную альфа-энергию на единицу объема, как и существующая смесь. ЭРОА радона определяется:

$$\text{ЭРОА} = 0,105 \cdot \text{ОА}_{\text{RaA}} + 0,515 \cdot \text{ОА}_{\text{RaB}} + 0,380 \cdot \text{ОА}_{\text{RaC}}, \quad (1)$$

где ОА_{RaA} , ОА_{RaB} , ОА_{RaC} — объемная активность в воздухе помещения ДПР радона — соответственно изотопов ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , Бк/м³.

Величина сдвига радиоактивного равновесия между радоном и его ДПР количественно характеризуется коэффициентом равновесия:

$$F = \frac{\text{ЭРОА}}{\text{ОА}}. \quad (2)$$

F изменяется в помещениях от 0,2 до 0,7, среднее значение — 0,4¹.

Радон выполняет ключевую роль в механизме формирования радоновой нагрузки в зданиях, является поставщиком скрытой энергии или ЭРОА радона, которая следует во времени и в пространстве за динамично меняющейся концентрацией радона, но при меньшей, пропорционально величине коэффициента равновесия и ОА.

Зависимость уровня радиационного риска от величины ЭРОА радона приведена в табл. 1. Нормативу для эксплуатируемого жилья 200 Бк/м³ соответствует пожизненный риск примерно 6 % [10, 11]. Если ЭРОА превышает 500 Бк/м³, то риск становится больше 15 %, а необходимость выполнения мероприятий по снижению облучения — вполне очевидной.

Таблица 1

Эффективные дозы и риски, связанные с радоном [12]

ЭРОА, Бк/м ³	Назначение строительного объекта	Экспозиция		Эффективная доза, мЗв		Риск	
		час/год	лет	за год	суммарная	за год	суммарный
16 (фон)	—	7000	70	1,0	70	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$
100	Строящееся жилье	7000	70	6,3	440	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$
200	Действующее жилье	7000	70	12,6	880	$9,2 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$
310	Производство	2000	50	7,4	370	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$
1200	Урановые рудники	1700	20	29*	580	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$
1200	Персонал группы А	1700	50	29*	1450	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-2}$

*Расчет дозы выполнен, исходя из объема вдыхаемого воздуха 2400 м³/год

Эффективные дозы от радона рассчитываются с использованием условного дозового перехода — от экспозиции ЭРОА радона (Бк/м³) переходят к эффективной дозе (нЗв) через коэффициент, рассчитанный путем сравнения рисков. Это соотношение зависит от распределения активности по размерам аэрозолей, доли свободной фракции, скорости дыхания, доли активности, осевшей в разных частях легких, глубины расположения радиочувствитель-

¹ СанПиН 2.6.1.2523—09/2009. Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902170553>.

ных клеток легочного эпителия. Значения дозового коэффициента равны $12 \cdot 10^{-6}$ нЗв на $1 \text{ Бк} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$ для производственных условий и $9 \cdot 10^{-6}$ нЗв на $1 \text{ Бк} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$ — для жилых зданий [13].

В России такой подход впервые применен еще при подготовке «Норм радиационной безопасности» НРБ—69 и с тех пор, несмотря на существенные изменения номинальных значений коэффициентов риска на единицу дозы, норматив по радону практически не изменился.

Уровень радиационного риска $6,4 \cdot 10^{-2}$ за 70 лет, соответствующий среднегодовой ЭРОА радона $200 \text{ Бк} / \text{м}^3$, нельзя признать вполне приемлемым.

Целью настоящего исследования является выполнение работ по оценке уровней облучения населения за счет радона и разработке комплекса мероприятий по обеспечению радоновой безопасности на территории г. Волгограда. В этой связи проведено определение содержания радона в зданиях из различных строительных материалов жилого фонда во всех районах города.

Проведены исследования ОА радона в холодный период года в 174 домах Волгограда. Исследования проводились в зданиях, построенных из различных строительных материалов. Приведенные в табл. 2 и на рисунке данные являются частью выполненных исследований [14, 15].

Т а б л и ц а 2

Показатели объемной активности радона и дочерних продуктов распада на первых этажах жилищного фонда г. Волгограда

№ п/п	Материал жилого здания	Число измерений	Среднее значение ОА, $\text{Бк} / \text{м}^3$	Диапазон вариаций ОА, $\text{Бк} / \text{м}^3$
1	Силикатный кирпич	12	33,9	7,9...72,4
2	Панели	84	25,8	9,1...76,5
3	Железобетон	19	31,8	23,2...94,5
4	Керамический кирпич	16	31,4	9,7...71,0
5	Блоки	21	38,5	15,2...97,4
6	Дерево	22	39,5	11,2...96,0

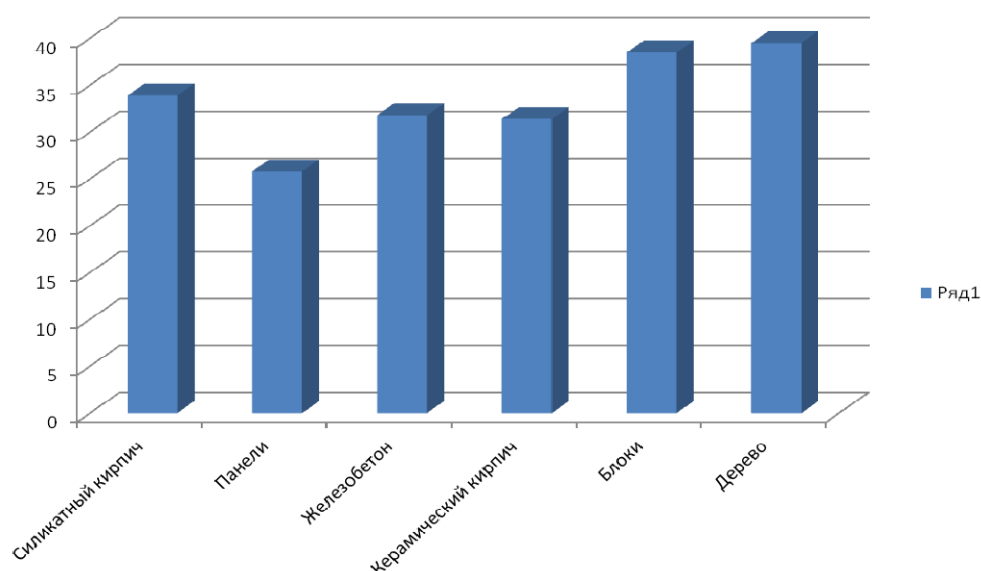
Ущерб коллективному здоровью населения определяется малыми концентрациями радона, поэтому присутствие его в помещениях представляет серьезную проблему.

Полученные результаты позволяют выявить изменения ОА радона. Анализ результатов измерений показал, что концентрация ^{222}Rn и ДПР в воздухе обследуемых помещений находится в пределах $7,9 \dots 97,4 \text{ Бк} / \text{м}^3$. ОА радона и ДПР на первых этажах каменных многоэтажных зданий и в деревянных домах не превышает нормативных показателей.

Одним из основных положений стратегии энергоэффективности зданий является повышение требований к энергосбережению во вновь возводимых зданиях. Меры по энергосбережению, снижению затрат на отопление базируются, прежде всего, на снижении потерь тепла через ограждающие конструктивные элементы за счет теплопроводности и конвекции. Один из основных методов ограничения теплового потребления — снижение неконтролируемого воздухообмена с наружной атмосферой при пассивном режиме эксплуатации. Однако снижение тепловых потерь приводит к трансформации

микроклимата помещений. Очевидно, что при снижении кратности воздухообмена может происходить ухудшение качества воздуха помещений.

Сокращение энергопотребления в новых зданиях достигается за счет применения железобетонных и монолитных бетонных конструкций в сочетании с использованием различных эффективных утеплителей, внешних изоляционных панелей, герметичных стеклопакетов, а также специальных требований к планировке.



Зависимость средней ОА радиона в зимний период от материала жилого здания, Бк/м³

При проектировании зданий могут использоваться высокоэффективные системы отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и водонагревательных систем. Если в энергосберегающих домах отсутствует механическая приточно-вытяжная система вентиляции, то происходит увеличение ОА радиона по сравнению с домами низкой энергоэффективности и с высокой проницаемостью ограждающих конструкций [16, 17].

В энергоэффективных зданиях радоновые нагрузки населения определяются следующими факторами:

- экспозиция пассивного режима вентиляции;
- периодичность проветривания;
- режим содержания помещений.

Отключение или неисправная работа механических систем приточно-вытяжной вентиляции могут способствовать резкому росту поступления радиона в помещение.

Благоприятная радоновая обстановка в зданиях обеспечивается современными технологиями строительства: рациональным проектированием подземной оболочки и обеспечением достаточной кратности воздухообмена. Решение проблемы снижения радоновых нагрузок может быть осуществлено путем комплексных исследований. Чрезвычайно важным этапом решения этой проблемы является разработка новых и определение реализуемых на

рынке строительных и отделочных материалов с низкими эффективными удельными активностями для снижения радиационного фона в помещениях и защиты населения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ): Рекомендации Международной комиссии по радиационной защите от 2007 года / Под ред. Л.-Э. Холма. Перевод с англ. под общ. ред. М. Ф. Киселева и Н. К. Шандалы. М. : Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 344 с.
2. Жуковский М. В., Ярмошенко И. В., Киселев С. М. Современные подходы к нормированию облучения радоном и анализ последствий их применения в России // Аппаратура и новости радиационных измерений. 2011. Т. 5. С. 18—25.
3. Health Effect of Exposure to Radon. Committee on Health Risks of Exposure to Radon (BEIR IV). National Academy Press. Washington, 1999.
4. Henchel D. B. Radon Reduction Techniques for Detached Houses. Technical Guidance (Second Edition). US Environmental Protection Agency, 1988.
5. Sidelnikova O. P., Khorzova L. I., Sidyakin P. A. Radiation-relation hygienic assessment of materials in complexes of the Volgograd region // Spatium. 2016. Vol. 36. Pp. 46—54.
6. Сидельникова О. П. Радиационно-экологическая безопасность в строительстве // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 3(88). С. 201—208.
7. Глазачев И. В. Оценка изменчивости радоноопасности существующих зданий в рамках суточного мониторинга // Актуальные исследования. 2023. № 51(181). Ч. I. С. 55—59.
8. Калайдо А. В., Римшин В. И., Семенова М. Н. Оценка вкладов диффузионного и конвективного поступления радона в здания // Жилищное строительство. 2021. № 7. С. 48—54.
9. Цапалов А. А. Закономерности поведения радоновой радиоактивности в помещениях зданий и принцип контроля // Вестник МГСУ. 2011. № 3. С. 15—23.
10. Stefanenko I. V., Sidelnikova O. P. Ensuring the Radiation-Related Ecological Safety of Buildings // Applied Mechanics and Materials. 2018. Vol. 878. Pp. 243—247.
11. Задачи и методы радиационного контроля при строительстве зданий / И. В. Павлов, Л. А. Гулябянц, С. И. Иванов, С. Е. Охрименко, А. М. Маренный // Аппаратура и новости радиационных измерений. 2003. № 3. С. 2—12.
12. Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации: Доклад Научного комитета ООН по действию атомной радиации Генеральной Ассамблее за 2000 г. с приложениями. М. : Мир, 2002. 552 с.
13. Сидельникова О. П. Мониторинг радиационно-экологических характеристик зданий // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2019. № 2(26). С. 15—23.
14. Сидельникова О. П. Естественная радиоактивность строительных материалов Волгоградской области // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. Вып. 50(69). С. 30—36.
15. Ярмошенко И. В., Малиновский Г. П., Онищенко А. Д., Васильев А. В. Проблема облучения радоном в зданиях повышенного класса энергоэффективности // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12. № 4. С. 56—65.
16. Finne I. E., Kolstad T., Larsson M. Significant reduction in indoor radon in newly built houses // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 196. Pp. 259—263.
17. Arvela H., Holmgren O., Reisbacka H. Radon prevention in new construction in Finland: a nationwide sample survey in 2009 // Radiation Protection Dosimetry. 2012. Vol. 148. Pp. 465—474.

© Сидельникова О. П., 2024

Поступила в редакцию
в марте 2024 г.

Ссылка для цитирования:

Сидельникова О. П. Современные подходы обеспечения радонобезопасности зданий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 2(95). С. 200—207. DOI: 10.35211/18154360_2024_2_200.

Об авторе:

Сидельникова Ольга Петровна — д-р техн. наук, проф., Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Olga P. Sidelnikova

Volgograd State Technical University

MODERN APPROACHES TO ENSURING RADON SAFETY OF BUILDINGS

The article is devoted to the study of the dynamics of radon accumulation in the air of the lower floors of buildings constructed from various building materials. The results of the practical and theoretical work made it possible to determine the routes of radon entry into buildings, the places of its accumulation and movement. It is shown that the radon environment in a building is formed by two processes — the intake of radon from the soil base and its emanation from the materials of the enclosing structures, and the dominant process is determined by the combination of physical and mechanical characteristics of the soil and the design features of the underground shell of the building. The widespread use of modern technologies aimed at reducing heat losses is invariably accompanied by a decrease in the air exchange rate. This leads to deterioration of air quality in buildings and increased radon concentrations. The accumulation of radon in highly efficient buildings contributes to an increase in radon loads of the population and is determined by the mode of operation of the premises.

Key words: radon, daughter decay products, optimization principle, reference level, equivalent equilibrium volumetric activity, natural radionuclides, building materials, energy efficiency of the building, air exchange rate.

For citation:

Sidelnikova O. P. [Modern approaches to ensuring radon safety of buildings]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 2, pp. 200—207. DOI: 10.35211/18154360_2024_2_200.

About author:

Olga P. Sidelnikova — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation