



*А.В. Калайдо¹, В.И. Римшин²,
М.Н. Семенова², Г.С. Быков³*

¹Луганский государственный педагогический университет,

²Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН,

³Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДОНОВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ (НА ПРИМЕРЕ США)

Работа выполнена в рамках НИР 2020 года Российской академии архитектуры и строительных наук по теме «7.4.10 – Теоретическое исследование накопления радона в помещениях»

Большую часть годовой дозы радиоактивного облучения человек получает в зданиях от радона и его дочерних продуктов распада. С целью ограничения ущерба здоровью населения от радона санитарным законодательством установлены его предельно допустимые уровни в воздухе помещений, соблюдение которых достигается проектированием подземной оболочки здания с высоким сопротивлением переносу радона. Но подобный подход применим только к строящимся зданиям, тогда как проблема нормализации радоновой обстановки в существующих зданиях не менее актуальна. В статье проанализирован опыт обеспечения радонобезопасности эксплуатируемых зданий на территории США – одного из мировых лидеров в вопросах защиты населения от радона.

Радон, дочерние продукты распада, предельно допустимые уровни, сопротивление переносу, радонобезопасность эксплуатируемых зданий.

Радон – благородный радиоактивный газ, из всех его изотопов угрозу коллективному здоровью населения несет только ²²²Rn, основной естественный изотоп с периодом полураспада 3,8 дня. Относительно большой период полураспада позволяет радону-222 поступать в здания извне и накапливаться в воздухе помещений нижнего этажа в опасных концентрациях. Радон и его продукты распада негативно воздействуют на органы дыхания человека, длительное пребывание в помещениях с высокими уровнями радона может стать причиной возникновения рака легкого [1–2].

Поскольку реальную угрозу здоровью облучаемых в быту создают пренебрежимо малые массовые концентрации радона во внутреннем воздухе, то для оценки его содержания используют объемную активность (ОА) радона, которая пропорциональна его массе. В европейских странах ОА измеряется в беккерелях на метр кубический (Бк/м³), в США – в пикокюри на литр (пКи/л), взаимный переход осуществляется следующим образом:

$$1 \text{ пКи/л} = 37 \text{ Бк/м}^3.$$

В РФ содержание радона оценивается по активности его дочерних продуктов распада (ДПР), поэтому предельно допустимые уровни установлены в единицах эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) ДПР радона, которая связана с объемной активностью радона соотношением

$$\text{ЭРОА} = F \cdot \text{ОА},$$

где F – коэффициент сдвига радиоактивного равновесия.

Для величин ОА и ЭРОА не существует однозначного перехода, так как коэффициент F зависит от

условий воздухообмена в конкретном помещении и может принимать значения в диапазоне от 0 до 1. Если величина F неизвестна, то в расчетах его значение следует принимать равным 0,4 согласно рекомендациям Международной комиссии по радиологической защите [3].

Процесс накопления радона в зданиях является многофакторным, на его характер влияют геофизические характеристики грунта под зданием, особенности конструкции и эксплуатации зданий и т.д. [4–6]. Поэтому в разных странах установлены собственные предельно допустимые величины ОА радона в быту: США – 4 пКи/л ($\approx 150 \text{ Бк/м}^3$), Германия – 200 Бк/м³, Бельгия – 300 Бк/м³, Финляндия – 400 Бк/м³ для существующих зданий и 100 Бк/м³ для строящихся [7]. В РФ также действует двухуровневый норматив, согласно которому величина ЭРОА продуктов радона не должна превышать 200 Бк/м³ для существующих зданий и 100 Бк/м³ для строящихся (в единицах ОА это 500 и 250 Бк/м³, соответственно). Всемирной организацией здравоохранения предложен эталонный уровень радона в помещениях ОА = 100 Бк/м³, при превышении которого рекомендуется проведение мероприятий по нормализации радоновой обстановки.

В США, как и в большинстве других развитых стран с умеренным климатом, облучение радоном в быту признано общенациональной проблемой, требующей комплексного решения. На государственном уровне вопросы обеспечения радоновой безопасности зданий находятся в ведении Агентства по защите окружающей среды (US EPA), разрабатывающего мероприятия по радоновому картированию территории страны и снижению уровней радона в зданиях. По оценкам US EPA, ежегодно около 21 000 смертей от

рака легкого в США могут быть вызваны бытовым облучением радоном и его ДПР.

Практически весь радон поступает в здание из грунта под ним, поэтому разрабатываемые защитные мероприятия направлены на снижение переноса почвенного газа через подземную оболочку здания. Случаи, когда избыточное содержание радона в помещении вызвано его выделением из материалов ограждающих конструкций, либо поступлением с водой, газом или наружным воздухом, являются экстраординарными и не требуют разработки комплекса защитных мероприятий.

Перенос радона из грунта в здания может осуществляться посредством диффузии и/или конвекции (адвекции), причем каждый из механизмов может быть доминирующим в зависимости от физико-механических характеристик грунта и конструкции подземной оболочки здания. Понимание закономерностей поступления радона в здания является ключевым в обеспечении их радоновой безопасности, так как каждому из механизмов переноса соответствуют свои радонозащитные технологии (табл.).

Таблица

Основные радонозащитные технологии

Механизм переноса	Технологии радонозащиты	
	Активные	Пассивные
Диффузионный	Активное разрежение почвы, вентиляция грунтового основания здания, принудительная вентиляция жилой зоны, создание избыточного давления в жилой зоне или подвале, радоновые колодцы и т.д.	Использование материалов с низким коэффициентом диффузии радона в них
Конвективный		Заделка щелей и стыков в фундаменте, устранение связи между почвенным воздухом и внутренним объемом помещения

На протяжении 30 лет в США проводились интенсивные исследования, посвященные установлению доминирующего механизма переноса радона в здания, финансируемые US EPA и Департаментом энергетики. По их результатам US EPA было заявлено, что поступление радона в помещения осуществляется под действием перепада давления снаружи и внутри здания через щели и трещины в фундаментных плитах. Данное утверждение было закреплено законодательно наряду с положением, что радоновая безопасность здания может быть полностью гарантирована лишь в случае применения активных технологий защиты от радона.

Порядок обеспечения радоновой безопасности существующих зданий в США регламентируется национальным радоновым стандартом, действие которого распространяется на все здания, имеющие не более трех этажей в высоту. Подобные здания относятся к типу одно-, двухсемейных или таунхаусов, их общей чертой является наличие не более четырех жилых комнат на общем фундаменте.

В соответствии с указанным выше стандартом, все существующие жилые малоэтажные дома на территории США должны быть оборудованы системой снижения поступления почвенного газа (Soil Gas Mit-

igation system), если объемная активность радона в них превышает национальный контрольный уровень в 150 Бк/м³. Основными функциями данной системы являются:

- снижение уровней радона в зданиях до значений, не превышающих международный, национальный, федеральный или другой референтный уровень, действующий на данной территории;

- снижение содержания в воздухе помещений других опасных газов и паров, поступающих из грунта, до значений, не превышающих предельно допустимые концентрации, установленные санитарным законодательством на данной территории;

- создание разрежения (зоны пониженного давления) в почве под зданием.

В США основным принципом обеспечения радоновой безопасности существующих зданий является устранение возможной опасности во избежание опасности подтвержденной. Данный принцип реализуется за счет применения технологии активного разрежения почвы (Active soil depressurization, ASD) – системы мероприятий по ограничению поступления радона за счет создания вентилятором зоны пониженного давления в грунте под плитой или мембраной.

Для конструкции пола с монолитной плитой основания (плавающая плита, плита на ростверке, плита над подполом) защита от избыточного поступления радона из грунта строится на *разрежении под плитой основания* (Sub-slab depressurization) – методе уменьшения поступления радона за счет поддержания более низкого давления воздуха под плитой основания, чем над ней при помощи вентилятора, отбирающего воздух из-под плиты. Данный метод имеет следующие конструктивные разновидности.

1. *Всасывающая яма* (suction pit) – полость объемом не менее 7 дм³ (7 л) создается под плитой основания в месте ввода всасывающего трубопровода (рис. 1а). Для более эффективного удаления радона слой под плитой должен иметь высокую воздухопроницаемость (порядка 10⁻⁹÷10⁻¹⁰ м²), для обеспечения данных условий наиболее подходит слой гравия толщиной 10...15 см. Во избежание поступления радона в жилую зону, неплотности в месте ввода всасывающей трубы герметизируются эпоксидной смолой или полимерной мастикой.

2. *Дренаж* (drain-tile) – в данном случае всасывающий трубопровод непосредственно отбирает почвенный воздух из дренажного слоя, образованного материалом с высокой воздухопроницаемостью (рис. 1б). В качестве дренажного материала принято использовать крупный гравий или геотекстиль.

3. *Колодец* (sump) – полость с почвенным воздухом не соединяется на прямую с всасывающим трубопроводом, ввод которого герметизируется крышкой из гибкого эластичного материала (рис. 1в). Недостатком подобной схемы является шум от работы системы ASD и утечки почвенного воздуха в жилые помещения.

При использовании в конструкции пола сплошного листового полимера (мембраны), размещаемого по фундаменту дома, метод снижения поступления радона из грунта носит название *подмембранного разрежения* (Sub-membrane depressurization). Его суть со-

стоит в поддержании более низкого давления воздуха в пространстве под мембраной замедлителя грунтового газа при помощи вентилятора системы активного разрежения почвы, отбирающего воздух из-под мембраны (рис. 2а).

Разрежение нежилого пространства (Non-habitable air space depressurization) используется при наличии в конструкции здания подпола – открытой области под жилым пространством, образованной бетонной плитой основания и грунтом (рис. 2б). Подпол чаще всего имеет высоту от 10 см до 1 м, он может проветриваться наружным воздухом или быть герметичным. Данный метод не используется для снижения поступления радона в здания, если подпол не изолирован от наружного воздуха.

Разрежение в пустотелых стенах (Block wall depressurization) используют из-за наличия воздушных полостей в них, а расположение всасывающей трубы в этом случае определяется характером размещения этих пустот в стенах и возможностью их герметизации (рис. 2в). При использовании данного метода пустоты в стенах должны быть надежно изолированы от поступления в них воздуха из помещения, открытой должна оставаться только сторона, прилегающая к грунтовому массиву.

При установке системы ASD в здании обязательным требованием является то, что элементы контура избыточного давления не должны проходить через жилую зону или под ней (рис. 3а).

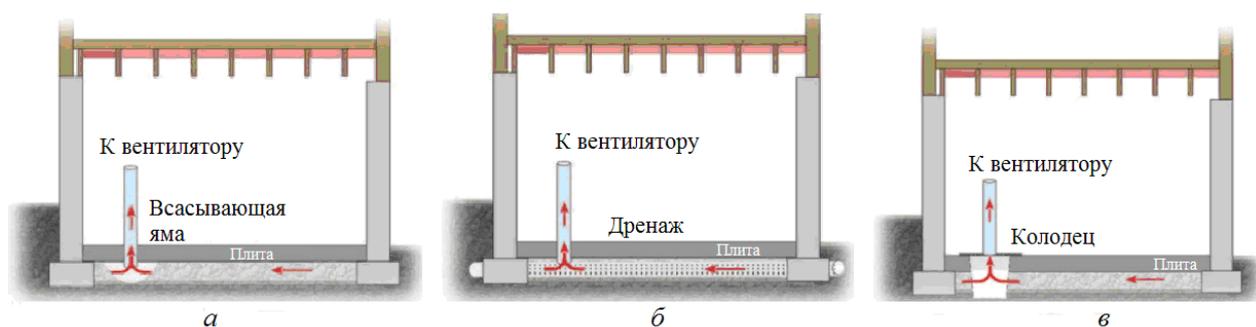


Рис. 1. Метод разрежения под плитой основания:
а – всасывающая яма; б – дренаж; в – колодец

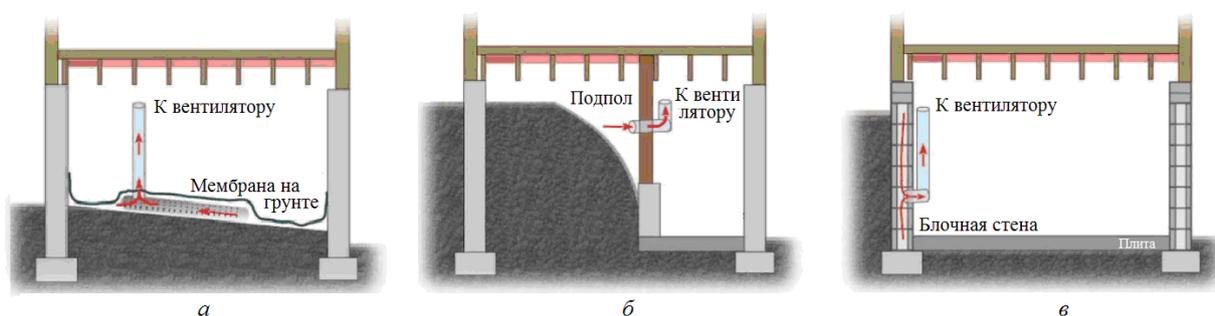


Рис. 2. Методы разрежения:
а – подмембранное; б – нежилого пространства; в – блочной (пустотелой) стены

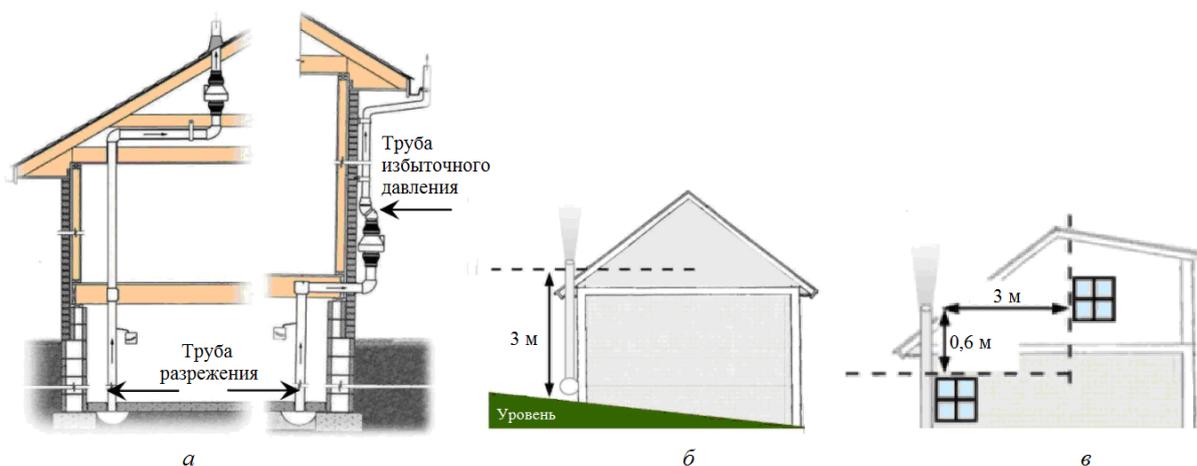


Рис. 3. Установка элементов системы активного разрежения почвы:
а – контура избыточного давления; б, в – точки удаления почвенного газа

Место установки точки выброса почвенного газа должно выбираться таким образом, чтобы по возможности минимизировать повторное поступление радона в жилую зону и облучение жильцов отведенным радоном за пределами здания. Для этого она должна располагаться не ближе 3 м над ближайшей зоной разрежения (рис. 3б), а также не менее 0,6 м над и не менее 3 м от ближайших проемов в ограждающих конструкциях здания, таких как окна, двери, каналы естественной вентиляции и т.д. (рис. 3в).

На территориях, для которых характерно повышенное содержание радона в воздухе помещений, стандартом предусматривается дополнительное использование двух активных методов радонозащиты, не связанных с активным разрежением почвы.

1. *Повышение внутреннего давления* (Indoor air pressurization) – создание и поддержание более высокого давления воздуха в жилой зоне, отделенной от грунта, которое при определенных условиях эффективно препятствует поступлению почвенного воздуха. При помощи механической вентиляции воздух из верхних этажей или снаружи здания подается к газопроницаемому слою под фундаментом или в воздушное пространство, находящееся в контакте с грунтом.

2. *Разбавление почвенного воздуха* (Soil gas dilution) – состоит в снижении концентрации радона в почвенном воздухе посредством разбавления его наружным воздухом с низким содержанием радона. Естественная или механическая вентиляция подает наружный воздух в газопроницаемый слой под фундаментом или в воздушное пространство, находящееся в контакте с грунтом.

Выполненный анализ опыта обеспечения радонобезопасности зданий в США показал, что в основе разработки средств и методов радонозащиты лежит постулат о безусловном доминировании конвективного поступления радона в здания и сооружения, который не является общепризнанным даже среди американских исследователей, хотя и закреплен на законодательном уровне. В результате активное разрежение почвы рекомендовано US EPA как единственное надежное средство защиты от конвективного поступления грунтового радона.

Активные методы радонозащиты, основанные на удалении радона из грунта под зданием или из воздуха нежилой зоны, являются достаточно надежными при практически любом содержании радия в грунте. Но они дороги и энергозатратны, аппаратура ASD-систем является источником шумов и вибраций, а ее монтаж требует внесения изменений в конструкцию здания. В то же время американский опыт использо-

вания активных систем радонозащиты может с успехом быть применен в России при строительстве малоэтажного жилья на радоноопасных территориях, где обеспечение благоприятной радоновой обстановки в зданиях исключительно посредством пассивных технологий крайне проблематично или попросту невозможно.

Литература

1. ICRP Publication 115. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon / ed. C. H. Clement // *Annals of the ICRP*. – 2010. – Vol. 40 (1). – 64 p.

2. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies / Darby S., Hill D., Auvinen A. [et al.] // *British Medical Journal*. – 2005. – P. 223–227.

3. ICRP: Protection against radon-222 at home and work. International Commission on Radiological Protection Publication 65. Pergamon, 1994. – 89 p.

4. Гулабянц, Л. А. Математическая модель формирования радоновой обстановки в здании / Л. А. Гулабянц, А. В. Калайдо, М. И. Лившиц // *АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений*, 2017. – № 1 (88). – С. 41–49.

5. Гулабянц, Л. А. Принцип построения новых норм проектирования противорадоновой защиты зданий / Л. А. Гулабянц // *Благоприятная среда жизнедеятельности человека. Строительные науки*, 2009. – № 5. – С. 461–467.

6. Радоновая безопасность зданий / М. В. Жуковский, А. В. Кружалов, В. Б. Гурвич, И. В. Ярмошенко. – Екатеринбург : УрО РАН, 2000. – 180 с.

7. Barros, N. Utility of short-term basement screening radon measurements to predict year-long residential radon concentrations on upper floors / Barros N., Steck D. J., William Field R. // *Radiation Protection Dosimetry*. – 2016. – 171 (3) – P. 405–413.

8. Мосаков, Б. С. Основы технологической механики тяжелых бетонов / Б. С. Мосаков, В. Л. Курбатов, В. И. Римшин. – *Минеральные Воды*, 2017. – 209 с.

9. Основные проблемы эксплуатации крупнопанельных зданий и пути их решения / М. В. Грязнов, М. В. Попова, А. В. Власов [и др.] // *Естественные и технические науки*. – 2014. – № 9–10 (77). – С. 355–357.

10. Варламов, А. А. Модели поведения бетона. Общая теория деградации. Для студентов инженерно-строительных факультетов, получающих образование по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» / Варламов, А. А., Римшин В. И. – Москва : ИНФРА-М, 2019. – 435 с.

A.V. Kalaydo¹, V.I. Rimshin², M.N. Semenova², G.S. Bykov³
Luhansk State Pedagogical University¹, Research Institute of Building Physics RAASN²,
Mordovia State University named after N.P. Ogarev³

ANALYSIS OF FOREIGN EXPERIENCE IN ENSURING RADON SAFETY OF OPERATED BUILDINGS (ON THE EXAMPLE OF THE UNITED STATES OF AMERICA)

Most of the annual dose of radiation a person receives in buildings from radon and its daughter products of decay. In order to limit the damage to public health from radon, the sanitary legislation sets its maximum permissible levels in the air of premises, the observance of which is achieved by designing the underground shell of a building with a high

resistance to radon transport. But this approach is only applicable to buildings under construction, while the problem of normalizing the radon situation in existing buildings is no less urgent. The article analyzes the experience of ensuring radon safety of operated buildings in the United States – one of the world leaders in protecting the population from radon.

Radon, daughter decay products, maximum permissible levels, transport resistance, radon safety of operated buildings.