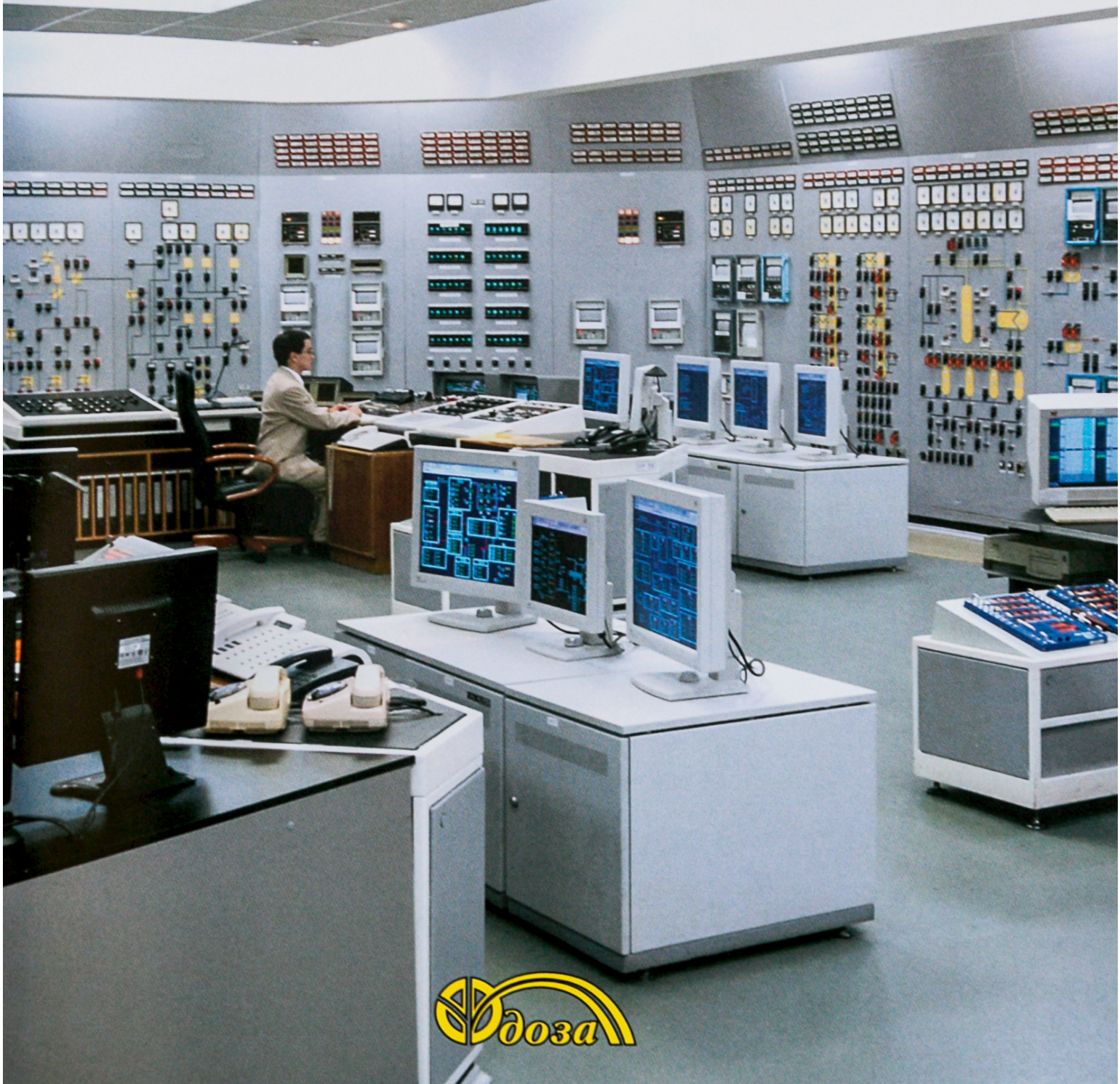


- Принципы радонового контроля в помещениях зданий
- Радиационная безопасность в лучевой терапии
- Методические основы группового дозиметрического контроля на предприятии
- Установка для поверки индивидуальных дозиметров бета-излучения УПБ-ИД





(1852-1908)

АНТУАН АНРИ БЕККЕРЕЛЬ

СОДЕРЖАНИЕ номера

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

- 2** Методические основы группового дозиметрического контроля на предприятии
Е.И.Григорьев, В.П.Ярына
- 6** Принципы радонового контроля в помещениях зданий
А.А.Цапалов, А.М.Маренный
- 15** Радиационная безопасность в лучевой терапии с использованием ускорителей электронов
К.Нурлыбаев, Ю.Н.Мартынюк, А.И.Каракаш, Л.Л.Синников, Е.Н.Лыкова, Ж.Ж.Галаяудинова, А.Ю.Бушманов, А.Г.Цовьянов, С.И.Иванов, С.В.Логинава
- 22** Математическое моделирование поля концентрации радона в окрестности подземной части здания
Л.А.Гулабянц, М.И.Лившиц
- 29** Экстремальное эманирование горной породы в условиях повышенной влажности
С.А.Кургуз, Р.А.Назирова, И.В.Тарасов
- 39** Оценка погрешностей измерения поглощенных доз кожными и глазными дозиметрами с отличающимися толщинами активных и защитных слоев
А.И.Сюрдо, А.В.Болдеш, М.И.Власов, И.И.Мильман
- 46** Оценка суммарной неопределенности при проведении радиозонологического мониторинга почв г.Москвы
В.А.Габлин, М.О.Большаков, Л.В.Говорова, С.О.Шанин, А.И.Логинава, Е.А.Блистанова
- 56** Воспроизведение мощности поглощенной дозы фотонного излучения в графите с помощью графитовой экстраполяционной камеры в графитовом фантоме
А.В.Берлянд, В.А.Берлянд
- 60** Установка для поверки индивидуальных дозиметров бета-излучения УПБ-ИД
И.О.Васильев, В.А.Стяжкин, Л.Л.Синников
- 65** Оценка радиационных рисков на индивидуальном уровне при многократном использовании в диагностических целях компьютерной томографии
В.К.Иванов, В.В.Кашеев, С.Ю.Чекин, А.Н.Меняйло, Е.А.Пряхин, А.Ф.Цыб, Ф.А.Меттлер
- 78** Использование ГИС-технологий для анализа данных радиационных обследований объектов окружающей среды
Ю.В.Орлов, М.В.Ивлиев, В.Ю.Зубов, Л.Ф.Вербова, И.П.Коренков

Научно-информационный журнал
по радиационной безопасности

анри

АППАРАТУРА И НОВОСТИ
РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ISSN 2075-1338



№1 (76) 2014

Главный редактор

А.Н.Мартынюк

Редакционная коллегия:

А.Е.Бахур, А.П.Ермилов, И.П.Коренков,
Ю.Н.Мартынюк, К.Н.Нурлыбаев,
В.И.Фоминых

Макетирование и компьютерная верстка:

М.Н.Мартынюк

Журнал "АНРИ" внесен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук редакции 2011 года.

Адрес редакции:

124460, Москва, а/я 50. НПП «Доза».
Тел.: (495)777-13-36 (доб.122),
(495)777-84-85. Факс: (495) 742-50-84.

E-mail: anry@doza.ru

Internet: <http://www.doza.ru>

Соучредители:

- НПП «Доза»
- Государственный комитет по санэпиднадзору РФ
- Метрологическая Академия РФ

Журнал зарегистрирован комитетом РФ по печати 24 января 1995 г., свидет. № 013255

© Научно-производственное предприятие «Доза», 2014 г.

Подписано к печати 15.02.2014 г.
Объем 6 уч.-изд.л. Тираж 1000 экз.

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных объявлений. Рукописи не возвращаются. Использование материалов допускается только с письменного разрешения редакции.

Математическое моделирование поля концентрации радона в окрестности подземной части здания

Описаны математическая модель и результаты моделирования поля концентрации радона в грунте, окружающем подземные ограждающие конструкции здания. Модель представлена в виде решения краевой задачи двумерного диффузионного переноса радона в системе сред «грунт–здание–атмосфера». Установлены закономерности распределения концентрации радона в зависимости от ширины и заглубления здания, рассчитаны отношения средних значений концентрации в плоскостях контакта конструкций с грунтом к величине его радонового потенциала.

Ключевые слова: радон, здание, ограждающие конструкции, грунтовое основание, радоновая нагрузка, перенос радона, двумерное поле, математическая модель.

Л.А. Гулабянц (НИИСФ РААСН, г. Москва), М.И. Лившиц (МИЭМ НИУ ВШЭ, г. Москва)

Процесс формирования радоновой обстановки в зданиях подвержен воздействию множества факторов и остается малоизученным, несмотря на возросшее в последние годы количество проведенных исследований. Одной из причин такой ситуации является то, что развитию теории и математическому моделированию переноса радона в совокупности компонентов системы, которую составляют здание и окружающие его среды, не уделяется должного внимания.

Очевидно, что математическое моделирование такого сложного процесса возможно лишь с принятием определенных упрощающих допущений. Оно не может дать полного представления о процессе, но оно позволяет установить значимость и направление действия тех или иных факторов, исследовать процесс, освободив его от действия случайных или малозначимых факторов, устано-

вить характеризующие процесс параметры. И, главное, выявить общие закономерности процесса, знание которых необходимо, в частности, для планирования соответствующего ставящейся цели эксперимента [1].

Известен ряд теоретических работ, посвященных исследованиям процесса переноса радона в природной системе «грунт–атмосфера». Их цели заключались, в основном, в разработке эманационных методов разведки радиоактивных рудопроявлений, методов геологического картирования, прогноза землетрясений [2-8]. Ближе всего к рассматриваемому здесь вопросу стоят исследования, направленные на разработку методов «оценки потенциальной радоноопасности территорий». Подчеркнем – территорий, а не зданий на этих территориях. Эти разные по сути задачи нетождественны.

Здание и граничащий с его

подземными конструкциями грунт представляют собой единую природно-техногенную систему, в которой закономерности переноса радона существенно отличаются от переноса в системе «грунт–почва–атмосфера». Основная цель изучения свойств первой из названных систем, по-видимому, должна заключаться в разработке метода определения количества радона, который поступает в здание вследствие воздействия на его подземные ограждающие конструкции радоновой нагрузки, создаваемой грунтом. Величина такой нагрузки количественно характеризуется значениями объемной активности (далее – концентрации) радона в плоскостях контакта конструкций с грунтом.

В [9] расчетное значение радоновой нагрузки A_p для горизонтальной конструкции предложено принимать с запасом, приближенно определяя как:

$$A_p \approx \Pi_{Rn}, \quad (1)$$

$$\Pi_{Rn} = C_{Ra,гр} \cdot \rho_{гр} \cdot k_{эм,гр}, \quad (2)$$

где Π_{Rn} – радоновый потенциал грунта, Бк/м³; $C_{Ra,гр}$ – удельная активность радия-226 в грунте, Бк/кг; $\rho_{гр}$ – плотность грунта, кг/м³; $k_{эм,гр}$ – коэффициент эманирования радона в грунте.

Поскольку требуемое значение сопротивления радонопроницанию конструкции рассчитывается как величина, прямо пропорциональная радоновой нагрузке, уточнение значений A_p представляется достаточно актуальным.

Формула (1) получена в предположении одномерного переноса радона в многослойной среде, представляющей элементы ограждающей конструкции и грунта конечной толщины и неограниченной протяженности [10]. При этом действие краевых эффектов, обусловленных ограниченными в плане размерами здания, и зависимость нагрузки от заглубления здания не рассматривались. Учет краевых эффектов позволяет повысить точность прогностического расчета концентрации радона в помещениях проектируемого здания.

Математическая модель представляет собой аналитическое решение краевой задачи двумерного стационарного диффузионного переноса радона в системе, включающей в себя наружный воздух, заглубленную часть здания неограниченной протяженности и прилегающий к ней массив однородного грунта. Рассматривается сечение S плоскостью, перпендикулярной направлению длины здания (рис.1).

Концентрация радона в грунте $A(x,y)$ в области $S = \{0 \leq x \leq H_x, 0 \leq y \leq H_y\}$ получается как решение системы дифференциальных уравнений:

$$D_s \left(\frac{\partial^2 A_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_s}{\partial y^2} \right) - \lambda \cdot A_s(x,y) + W_s = 0, \quad (3)$$

где $A_s = A(x,y)$ – концентрация радона для заглубленной части здания при $s = 1$ и для грунта при $s = 2$, Бк/м³, $\lambda = 2,1 \cdot 10^{-6}$ – постоянная распада радона, с⁻¹, D_s ($s = 1, 2$) – коэффициент диффузии радона, м²/с, $W_s = \lambda \cdot \Pi_{Rns}$ ($s = 1, 2$) Бк/(м³·с) – мощность внутренних источников радона, Бк/(м³·с).

Граничные условия выглядят следующим образом:

$$D_1 \left(\frac{\partial A_1}{\partial y} \right) = \alpha \cdot A_1 \text{ при } 0 \leq x \leq d, y = 0, \quad (4)$$

$$D_2 \left(\frac{\partial A_2}{\partial y} \right) = \alpha \cdot A_2 \text{ при } d \leq x \leq H_x, y = 0, \quad (5)$$

$$D_1 \left(\frac{\partial A_1}{\partial x} \right) = 0 \text{ при } x = 0, 0 \leq y \leq h, \quad (6)$$

$$D_2 \left(\frac{\partial A_2}{\partial x} \right) = 0 \text{ при } x = 0, h \leq y \leq H_y, y = H_y, 0 \leq x \leq H_x, x = H_x, 0 \leq y \leq H_y, \quad (7)$$

$$D_1 \left(\frac{\partial A_1}{\partial x} \right) = D_2 \left(\frac{\partial A_2}{\partial x} \right), A_1 = A_2 \text{ при } x = d, 0 \leq y \leq h, \quad (8)$$

$$D_1 \left(\frac{\partial A_1}{\partial y} \right) = D_2 \left(\frac{\partial A_2}{\partial y} \right), A_1 = A_2 \text{ при } 0 \leq x \leq d, y = h, \quad (9)$$

где h ($h < H_y$) – высота подземной части здания (заглубление), м; d ($d < H_x$) – половина ширины здания, м; $\alpha = 0,1$ – коэффициент газообмена на поверхности грунта, м/с.

Область S делится прямыми $x = d$ и $y = h$ на четыре прямоугольника. Для каждого прямоугольника к соответствующему уравнению (2) с подходящими граничными условиями применяется метод разделения переменных и функция $A(x,y)$ ищется в виде:

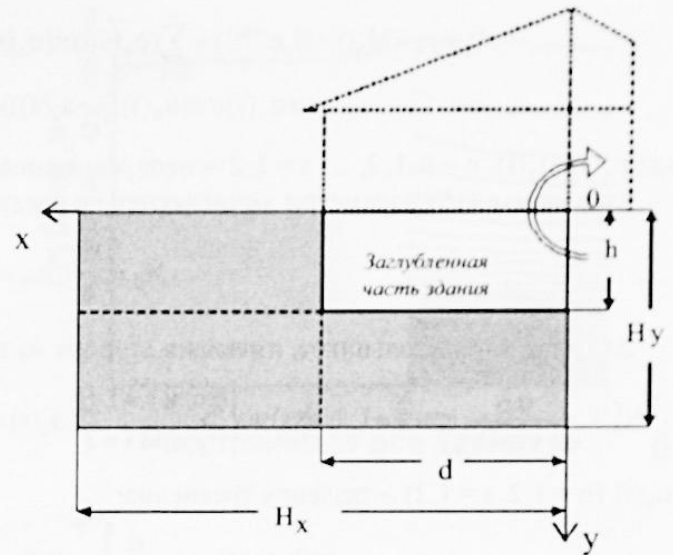


Рис.1. Область решения задачи (3)–(9).

$$A(x,y) = M_0(1 - N_0 e^{-\alpha x}) + \sum_{n=1}^{\infty} (p_n(s) \cos(u_n(s)(x - a_1(s))) (R_n e^{v_n(s)(y - b_1(s))} + e^{-v_n(s)(y - b_1(s))}) + q_n(s) \cos(u_n(s)(y - a_2(s))) \cosh(v_n(s)(x - b_2(s))), \quad (10)$$

где $p_n(s)$, $q_n(s)$, $n = 0, 1, 2, \dots$, $s = 1, 2$ – неопределенные коэффициенты.

Входящие в (10) параметры вычисляются по следующим формулам:

$$M_0 = \frac{W_s}{\lambda}, \quad \omega_s = \sqrt{\frac{\lambda}{D_s}} \quad \text{при } s = 1, 2.$$

Для двух прямоугольников, имеющих сторону на прямой $y = 0$:

$$N_0 = \frac{\alpha}{\alpha + \omega_s D_s} \quad \text{при } s = 1, 2; \quad a_1(s) = \begin{cases} 0 & \text{при } s = 1 \\ H_x & \text{при } s = 2 \end{cases}; \quad a_2(s) = h \quad \text{при } s = 1, 2; \quad b_1(s) = 0 \quad \text{при } s = 1, 2; \quad b_2(s) = \begin{cases} 0 & \text{при } s = 1 \\ H_x & \text{при } s = 2 \end{cases},$$

$u_n(s)$ ($n = 1, 2, s = 1, 2$) – решения уравнения:

$$\operatorname{tg}(h \cdot u_n(s)) + \frac{\alpha}{D_n u_n(s)} = 0; \quad R_n = \frac{\alpha + v_n(s) D_s}{\alpha - v_n(s) D_s}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad s = 1, 2.$$

Для двух прямоугольников, для которых $y \geq h$:

$$N_0 = 0; \quad a_1(2) = b_2(2) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq d \\ H_x & \text{при } x \geq d \end{cases}; \quad a_2(2) = b_1(2) = \begin{cases} H_y & \text{при } x \leq d \\ H_y & \text{при } x \geq d \end{cases}$$

$$u(s) = \frac{\pi}{d} n \quad \text{при } x \leq d; \quad u(s) = \frac{\pi}{H_x - d} n \quad \text{при } x \geq d, \quad R_n = 1, \quad n = 1, 2, \dots$$

Для всех четырех прямоугольников:

$$v_n(s) = \sqrt{(\omega_s)^2 + u_n(s)^2}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad s = 1, 2.$$

Неопределенные коэффициенты находятся путем замены рядов в (10) конечными суммами и решения системы линейных уравнений, полученных после приравнивания значений функции $A(x,y)$ и ее производной на общих границах смежных прямоугольников.

Рассчитанные значения неизвестных задают приближенные значения функций концентрации радона в каждом из 4-х прямоугольников. Объединение полученных таким образом функций представляет искомую функцию $A(x,y)$.

Определение значений $A(x,y)$ проводилось для заданных параметров рассматриваемой системы с использованием компьютерной математической программы MAPLE. В дальнейшем расчеты проведены для наиболее проницаемого сухого грунта с коэффициентом диффузии радона $D_2 = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ с радоновым потенциалом $P_{Rn} = 32 \text{ кБк/м}^3$ и для бетона заглавленной части здания с коэффициентом диффузии радона $D_1 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$.

Функция $A(x,y)$ определяет закономерности изменения концентрации радона в области S при различных значениях h и d . На рис.2 представлены изолинии функции $A(x,y)$, соответствующие уменьшения концентрации на 1 кБк/м^3 от величины 31 кБк/м^3 , для здания шириной 12 м ($d = 6 \text{ м}$) при его различных заглавлениях. На всех приводимых далее рисунках система координат повернута вокруг ее начала на 180° относительно принятой на рис.1.

На рис.2а показаны изолинии концентрации радона в грунте при отсутствии здания, на рис.2б, 2в, 2г при заглавлении здания на $h = 0,25 \text{ м}$, $h = 2,0 \text{ м}$, $h = 6 \text{ м}$, соответственно.

Рис.2а соответствует случаю, когда на открытой территории образующийся в поверхностных слоях Земли радон, перемещаясь к дневной поверхности, беспрепятственно выходит в атмосферу. Концентрация радона в параллельных поверхности Земли плоскостях принимает одно и то же значение, возрастает с увеличением глубины, стремясь к значению P_{Rn} .

Рис.2б соответствует случаю большого заглавления здания, когда препятствие, которое создает слой грунта толщиной h выносу радона в атмосферу с глубины h , соизмеримо с препятствием, которое создает здание. Можно видеть, что на рис.2б распределение концентрации радона в грунте приближается к показанному на рис.2а.

Рис.2в и 2г соответствуют случаям относительно небольшого заглавления здания. В этих случаях слой грунта толщиной h создает меньшее, чем здание, препятствие для разгрузки радона из грунта в атмосферу.

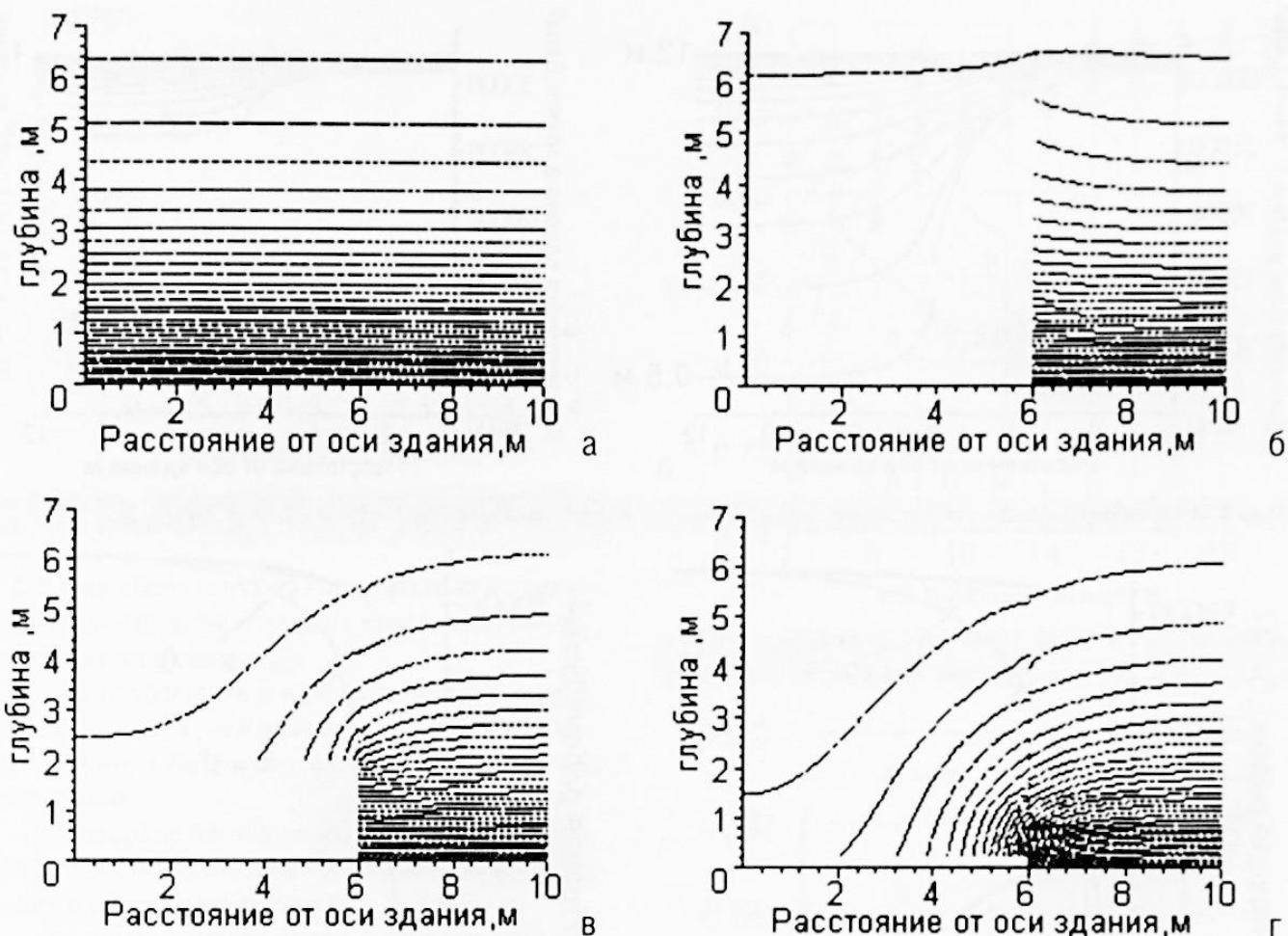


Рис.2. Расположение изолиний концентрации радона в грунте.

Расположение изолиний на рис.2в и 2г свидетельствует о частичном оттоке радона из-под здания в горизонтальном направлении и затем его выходе через поверхностный слой грунта в атмосферу.

Закономерности изменения концентрации радона в плоскости G контакта горизонтальной конструкции здания с грунтом ($y = h$) и в параллельных ей нижерасположенных плоскостях ($y = h_G$, $h_G > h$) определяются функцией $A(x, h)$ и функциями $A(x, h_G)$.

Графики этих функций для $d = 6$ м и различных величинах h_G приведены для $h = 0,5$ м на рис.3а и для $h = 3,0$ м на рис.3б.

Вид нижних кривых на рис.3а и 3б показывает, что концентрация радона в плоскости G после ее продолжения за пределы здания уменьшается в 6 раз при заглублении $h = 0,5$ м и на 15 % при $h = 3,0$ м. В расположенных ниже плоскостях значения этой разности стремятся к нулю по мере увеличения глубины h_G . Отмечаемый факт объясняется тем, что заглубленность здания определяет степень близости плоскости G к границе грунта и атмосферы.

В плоскости V контакта вертикальной конструкции здания с грунтом ($x = d$, $0 \leq y \leq H_V$) и параллельной ей плоскости ($x = 0$, $h \leq y \leq H_V$) изменение концентрации радона определяется функциями $A(d, y)$ и $A(0, y)$. Графики этих функций при $d = 6$ для $h = 0,5$ м и $h = 3,0$ м представлены на рис.4а и 4б.

При проведении полевых измерений неоднократно фиксировалось, что иногда плотность потока из грунта возрастает по мере приближения точек измерения к зданию. Расчеты показывают, что такое возрастание может иметь место лишь у мало заглубленных зданий. Этому соответствует характер кривых на рис.4 и на рис.5, на котором тонкая линия получается при $h = 0,5$ м, линия средней толщины при $h = 1,0$ м, толстая линия при $h = 2,0$ м.

Математическая модель позволяет уточнить соотношение (1) путем замены радонового потенциала P_{Rn} на среднюю величину концентрации радона A_{rp} на границах ограждающей конструкции здания и грунта.

Средняя величина концентрации радона A_{rpG} в плоскости G, характеризующая радоновую нагрузку на горизонтальную конструкцию, и средняя величина концентрации радона A_{rpV} в плоскости V, характеризующая

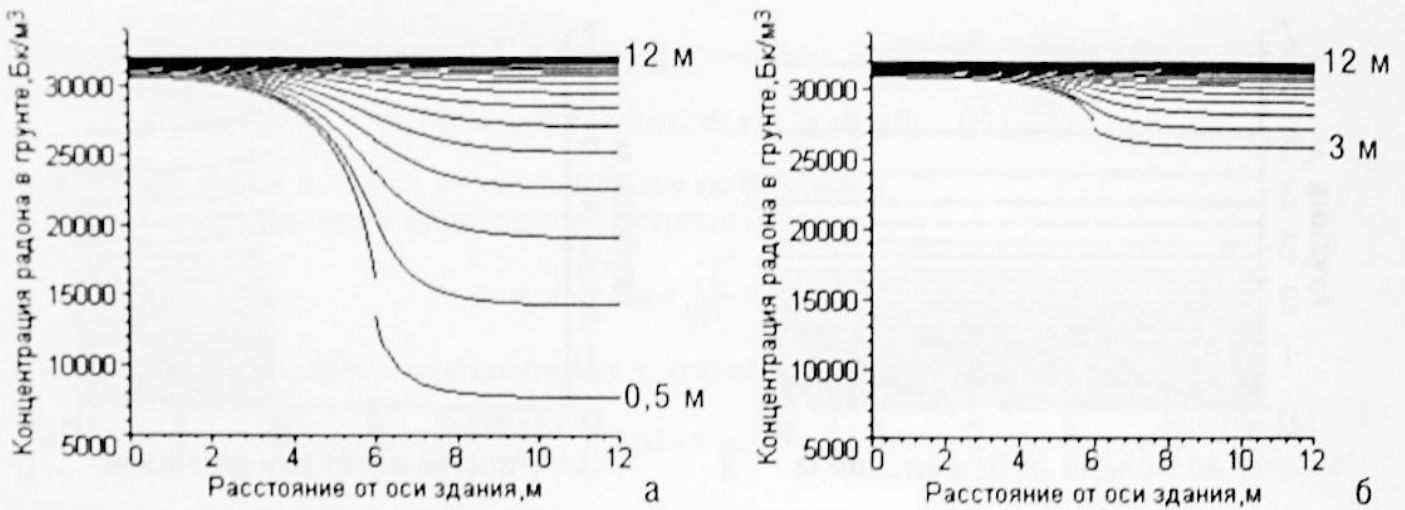


Рис.3. Изменение концентрации радона в грунте в горизонтальных плоскостях при: а) $h = 0,5$ м, б) $h = 3,0$ м.

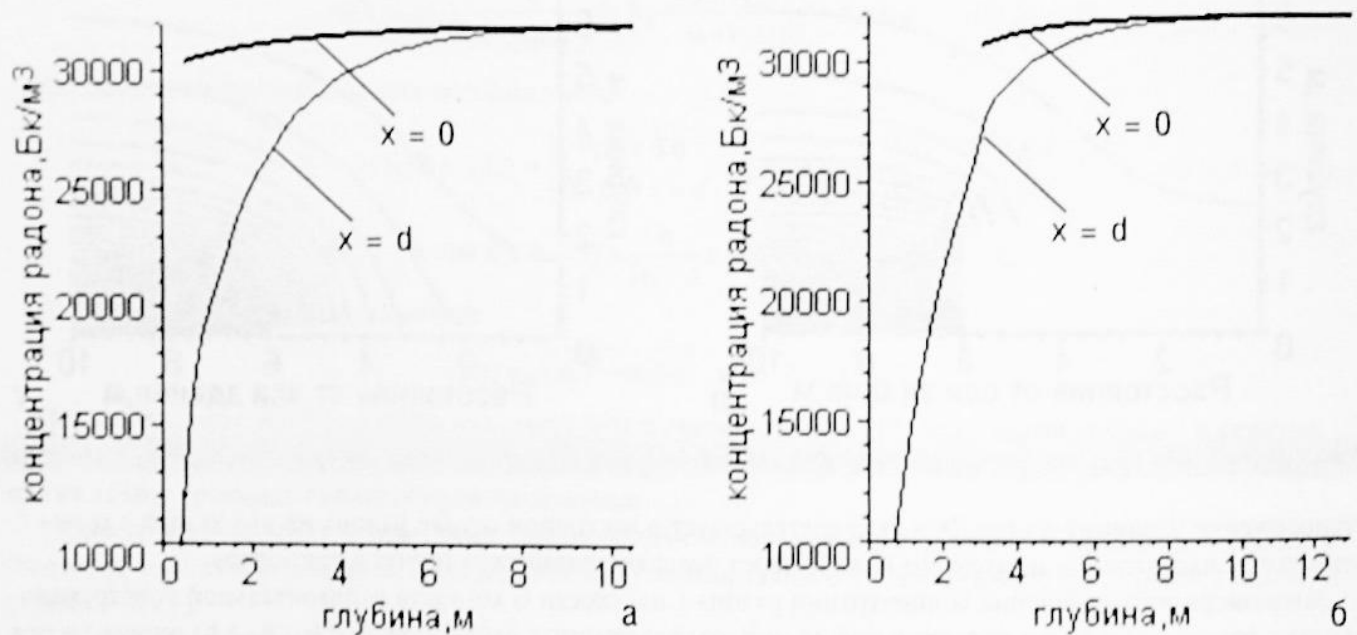


Рис.4. Изменение концентрации радона в грунте в вертикальных плоскостях при: а) $h = 0,5$ м, б) $h = 3,0$ м.

нагрузку на вертикальную конструкцию, определялись как:

$$\Lambda_{\text{г.г}} = \frac{1}{d} \int_0^d \Lambda(x, h) \cdot dx, \quad \Lambda_{\text{г.в}} = \frac{1}{h} \int_0^h \Lambda(d, y) \cdot dy. \quad (11)$$

Отличие средних значений концентрации от радонового потенциала грунта характеризуется коэффициентами:

$$Z_G = \Lambda_{\text{г.г}} / \Pi_{\text{гн}} \quad \text{и} \quad Z_V = \Lambda_{\text{г.в}} / \Pi_{\text{гн}}. \quad (12)$$

Зависимости величины Z_G от ширины и заглубления здания показаны на рис.6.

Вертикальная ограждающая конструкция не создает препятствия для выхода радона из грунта в атмосферу. Распределение концентрации радона по глубине в плоскости V незначительно отличается от распределения в параллельных ей плоскостях в открытом грунте лишь при небольшом заглублении здания. И практически не отличается при заглублении более 1 м. Зависимость величины Z_V от заглубления здания, не меняющаяся при различных значениях его ширины, приведена на рис.7.

Таким образом, установлено следующее.

1. Характер распределения концентрации радона в грунте при различных заглублениях зданий позволяет условно подразделить их на незаглубленные ($h < 1$ м), малозаглубленные ($1 < h < 2$ м) и заглубленные ($h > 2$ м).



Рис.5. Зависимость плотности потока радона из грунта от расстояния до стены здания.

2. В плоскости контакта горизонтальной ограждающей конструкции с грунтом среднее значение концентрации радона $A_{гp,г}$:

- у незаглубленных и малозаглубленных зданий значительно выше, чем значение концентрации радона в грунте в той же плоскости за пределами габаритов здания;
- при ширине здания менее 12–13 м у незаглубленных зданий существенно ниже, чем значение радонного потенциала грунта Π_{Rn} ;
- при ширине здания свыше 12–13 м и малом заглублении ниже, чем значение Π_{Rn} не более, чем на 10 %;
- у заглубленных зданий любой ширины практически равно значению Π_{Rn} .

3. В плоскости контакта вертикальной ограждающей конструкции с грунтом среднее значение концентрации $A_{гp,v}$:

- зависит от заглубления и практически не зависит от ширины здания;
- практически равно среднему значению концентрации радона в слое открытого грунта при его толщине, равной величине заглубления здания, и в связи с этим может вычисляться по формуле:

$$A_{гp,v} = \Pi_{Rn} \cdot \left[1 - \frac{L}{h} \operatorname{th} \left(\frac{h}{L} \right) \right],$$

где L – длина диффузии радона в грунте, м;

- возрастает по мере увеличения заглубления здания и приближается к значению Π_{Rn} при заглублении более 12 м.

Приведенные выше результаты могут быть приняты во внимание при определении расчетной радонной нагрузки на конструкции заглубленной части здания.

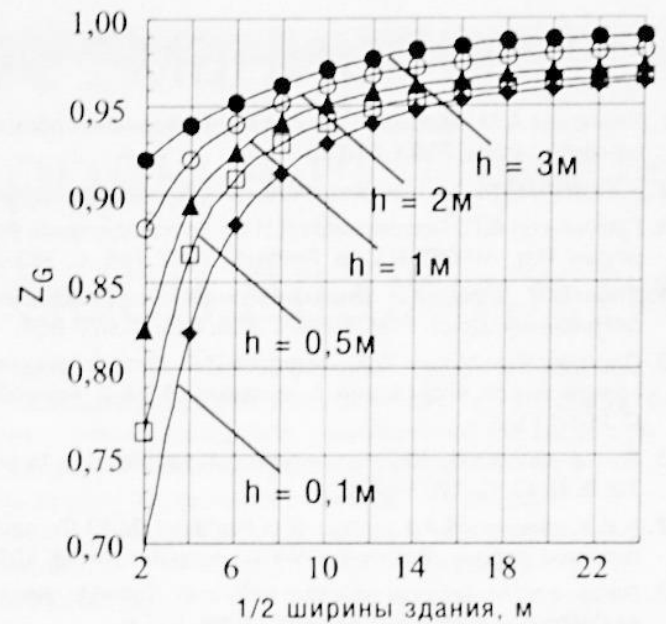


Рис.6. Зависимости значений коэффициента Z_G от ширины здания при его различных заглублениях.

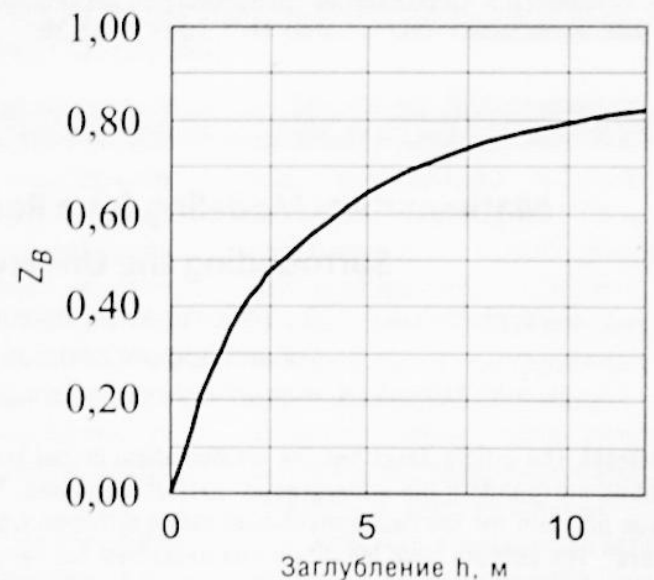


Рис.7. Зависимости значений величины Z_B от заглубления здания.

Литература

1. Вайнберг А.М. Математическое моделирование процессов переноса. Решение нелинейных краевых задач. Москва–Иерусалим, 2009, 210 с.
2. Хайкович И.М. Математическое моделирование процессов миграции радона. АНРИ №3(9), 1996/97. С. 99-107.
3. Граммаков А.Г., Попретинский И.Ф. Распределение радона в рыхлых отложениях при наличии ореолов рассеяния радия. Изв. АН СССР. Сер. Геофиз., 1957. №6. С. 783-787.
4. Уткин В.И., Юрков А.К. Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясения. Докл. РАН, 1998. Т. 358, №5. С. 675-680.
5. Паровик Р.И., Ильин И.А., Фирстов П.П. Математическая диффузионная модель массопереноса радона (Rn-222) в грунте и его эксхалация в приземный слой атмосферы. Вестник КРАУНЦ. Науки о земле, 2006, вып.1, №7. С.110-114.
6. Булашевич Ю.П., Хайритдинов Р.К. К теории диффузии эманаций в пористых средах. Изв. АН СССР, сер. геофиз. 1959, №12. С. 1787-1792.
7. А.В.Климшин, И.А.Козлова, Е.Н.Рыбаков, М.Ю.Луковской. Влияние промерзания поверхностного слоя грунтов на перенос радона. Вестник КРАУНЦ. Науки о земле, 2010, вып.16, №2. С. 146-151.
8. Radon and its decay products in indoor air. Edited by Nazarov W.W. and Nero A.V. Lawrence Berkeley Laboratory. University of California. Berkeley. California. 1988. 517 p.
9. Гулабянц Л.А. Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий. М.: ФЭН-НАУКА, 2013. 52 с.
10. Гулабянц Л.А. Определение требуемой радонозащитной способности подземных ограждающих конструкций зданий. Жилищное строительство. № 7, 2009. С. 34-38.

Mathematical Modeling for a Radon Concentration Field in Ground Surrounding the Underground Part of a Building

Gulabyants Loren (Scientific research Institute of building physics of the Russian Academy of architecture and building Sciences, Moscow);

Livshits Mikhail (Higher school of economic National research university, MIEM, Moscow)

Abstract. The article describes the mathematical model and modeling results for a radon concentration field in ground surrounding the underground part of a building. The model is represented as a solution of the boundary-value problem for the two-dimensional radon diffusion transfer in environmental system "ground-building-atmosphere". The authors have identified and described the nature of radon concentration distribution depending on the building width and depth of its foundation; the article presents calculation of the ratio between the average radon concentration in the plain of the building construction contact with the ground and its radon potential.

Key words: radon, building, building envelope, the foundation soil, transfer of radon, two-dimensional field, mathematical model.

Л.А.Гулабянц (профессор, д.т.н., зав.лаб.) – НИИСФ РААСН, г.Москва; М.И.Лившиц (к.ф.-м.н., доцент) – МИЭМ НИУ ВШЭ г.Москва.

Контакты: тел.: +7 (495) 482-39-65; e-mail: lor267gg@yandex.ru.