

# ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

Шаптала В.Г., д-р техн. наук, проф.  
Шаптала В.В., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РАДИАЦИОННЫМ ФОНОМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ СТРОЙИНДУСТРИИ

shaptalavadim@yandex.ru

Исследованы закономерности выделения радона сыпучим минеральным сырьем, на основе которых разработана математическая модель формирования радиационного фона производственных помещений, позволяющая выбрать оптимальный способ снижения концентрации активности радона.

**Ключевые слова.** Математическое моделирование, сыпучий материал, эманация радона, распределение зерен материала по размерам и форме, параметры системы вентиляции..

**Введение.** Важной функцией управления технологическими процессами производства строительных материалов является снижение вредной техногенной нагрузки на работников, производственную и окружающую среду. Одним из основных элементов производственной среды является микроклимат производственных помещений. Наряду с традиционно рассматриваемыми параметрами микроклимата: запыленностью, температурой, влажностью и подвижностью воздуха существует еще одна недостаточно осознанная и далеко не всегда учитываемая характеристика – радиационный фон помещений, вызванный поступающим в них радоном.

На радон и дочерние продукты его распада приходится около 70 % дозы, получаемой населением от естественного радиационного фона. Вдыхание радона и дочерних продуктов его распада вызывает более 20 % случаев заболеваний раком легких [1], что составляет по Российской Федерации более 9 000 случаев в год. Особенно интенсивно радон выделяется перерабатываемыми в цехах минеральным сырьем. Эффективная равновесная объемная активность радона в недостаточно проветриваемых помещениях цехов предприятий строительных материалов, особенно цокольных и подвальных нередко превышает предельно допустимую (200 Бк/м<sup>3</sup>), что представляет реальную угрозу для находящихся в этих помещениях людей [2]. В настоящее время методика прогнозирования и расчета концентрации радона в производственных помещениях отсутствует. Основным средством поддержания концентрации активности

радона на допустимом уровне является вентиляция помещений. Для расчета и проектирования систем вентиляции необходимо знать количество радона, поступающего в помещения [3].

**Основная часть.** Основным источником загрязнения воздушной среды производственных помещений промышленности строительных материалов радоном является перерабатываемое в них сыпучее минеральное сырье – клинкер, песок, глина, гравий, щебень и др. [4].

Свойства некоторых сыпучих материалов приведены в таблице 1.

Количество активности, выделяемое сыпучим материалом определяется его массой, удельной поверхностью материала и скоростью эксхалиции радона через поверхность зерен материала.

Сыпучие материалы состоят из зерен различных размеров и формы. Крупность зерен неправильной формы будем описывать тремя характерными размерами: наибольшим размером зерна – его длиной  $\delta_1$ , наибольшим поперечным размером  $\delta_2$  – шириной и наибольшим размером в направлении, перпендикулярном двум предыдущим – толщиной  $\delta_3$ .

По этим размерам, которые могут быть найдены опытным путем, объем зерна определяется с помощью эмпирического соотношения:

$$V = \frac{\delta_1 \delta_2 \delta_3}{2,2} \quad (1)$$

По объему зерна материала можно найти его эквивалентный размер  $\delta$ , равный диаметру шара такого же объема:

$$\frac{\pi\delta^3}{6} = \frac{\delta_1\delta_2\delta_3}{2,2} \quad (2)$$

Отсюда для эквивалентного размера получим выражение:

$$\delta = 0,954\sqrt[3]{\delta_1\delta_2\delta_3} \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что эквивалентный размер зерна практически равен среднему геометрическому трех характерных размеров.

Таблица 1

## Свойства сыпучих материалов, определяющие радоновыделение

Материал	Концентрация активности радия, $C_{\text{ра}}$ , Бк/кг	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Эманионный фактор, $\eta$	Пористость материала, $\varepsilon$	Коэффициент диффузии $D$ , $10^{-9}$ м <sup>2</sup> /с	Длина диффузии радона $L$ , м	Максимальная концентрация активности радона в поровом пространстве $C_{\text{max}}$ , $10^5$ Бк/м <sup>3</sup>
Песок кварцевый	7,6	2400	0,37	0,12	10	0,2	0,56
Гравий, галька	14	2500	0,07	0,05	8	0,28	0,49
Гранитный щебень	51	2700	0,18	0,01	0,5	0,15	24,8

Для математического описания формы зерен можно принять их классификацию в зависимости от вида поверхности (гладкая округлая или угловатая) и от соотношения характерных размеров. В зависимости от соотношения длины, ширины и толщины зерен можно выделить три класса зерен:

1) Изометрические зерна, для которых все три характерных размера близки по величине;

2) Плоские зерна, в которых два размера близки по величине и существенно больше третьего размера.

3) Удлиненные зерна, длина которых значительно больше двух других размеров.

Усредненное значение двух близких по величине размеров неизометрических зерен будем называть их поперечным размером  $\delta_{ac}$ , а третий размер – осевым  $\delta_{ax}$ . Отношение осевого размера к поперечному, характеризующее степень отклонения формы зерен от изометрической, будем называть коэффициентом анизотрии  $a$ :

$$a = \frac{\delta_{ax}}{\delta_{ac}} \quad (4)$$

Будем считать зерна изометрическими, если  $a$  больше 0,2 и меньше 0,4, плоскими, если  $a$  меньше 0,2 и удлиненными, если  $a$  больше 4.

Распределение зерен материала по их эквивалентным размерам определяется их зерновым составом, который может быть задан относительными массовыми долями  $\Delta D_i$  отдельных фракций материала ( $\delta_{i-1}$ ,  $\delta_i$ ). Будем считать, что все зерна  $i$ -ой фракции имеют одинаковый размер  $\bar{\delta}_i$ , равный среднему арифметическому границ фракции:

$$\bar{\delta}_i = (\delta_{i-1} + \delta_i)/2 \quad (5)$$

Каждую фракцию материала разделим на три подфракции по форме зерен. Относительные содержания подфракций обозначим  $\Delta D_{ij}$ , где  $i = 1, 2, \dots, n$  – номер фракции по размерам зерен, а  $j = 1, 2, 3$  – номер формы зерен: 1 – изометрическая, 2 – плоская, 3 – удлиненная. Должны выполняться следующие условия:

$$\sum_{j=1}^3 \Delta D_{ij} = \Delta D_i, \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 \Delta D_{ij} = 1 \quad (6)$$

Для каждой подфракции определяется среднее значение коэффициента анизотрии  $a_{ij}$ . Матрица распределения зерен гранитного щебня по размерам и форме представлена в таблице 2.

Детальное исследование распределение зерен сыпучего материала необходимо для более точного определения его удельной поверхности  $S_y$  (м<sup>2</sup>/кг), т.е. общей площади поверхности зерен материала в единице его массы:

$$S_y = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 \Delta D_{ij} \cdot S_{yij} \quad (7)$$

где  $S_{yij} = S_{yij}/m_{ij}$  – удельная поверхность зерна, принадлежащего  $i$ -ой фракции и имеющего  $j$ -ую форму (м<sup>2</sup>/кг),  $S_{ij}$  – площадь поверхности этого зерна,  $m_{ij}$  – его масса. Площадь поверхности и объем зерен сыпучего материала могут быть рассчитаны путем аппроксимации их телами правильной формы.

Для округлых зерен песка, гравия, гальки в качестве таких тел будем использовать шар и эллипсоиды вращения, угловатые зерна щебня будем аппроксимировать прямоугольными параллелепипедами.

Таблица 2

**Распределение зерен гранитного щебня по размерам и форме**

форма		размер ( $\delta_{i-1}; \delta_i$ ), мм					
		<5	5-10	10-20	20-40	40-80	>80
1	$\Delta D_{i1}$	0,015	0,06	0,12	0,20	0,14	0,03
	$a_{i1}$	0.9	0.5	1.2	2	2.4	1.5
2	$\Delta D_{i2}$	0.01	0.04	0.05	0.10	0.07	0.01
	$a_{i2}$	0.2	0.18	0.15	0.18	0.12	0.10
3	$\Delta D_{i3}$	0.005	0.02	0.03	0.05	0.04	0.01
	$a_{i3}$	4.2	5	5.3	4.8	4.4	4.1

Удельная поверхность округлых изометрических зерен, аппроксимируемых шаром, определяется формулой:

$$S_{yi1} = \frac{6}{\rho \bar{\delta}_i} \quad (8)$$

Для плоских зерен ( $a < 0,2$ ), аппроксимируемых сплюснутым эллипсоидом вращения, удельная поверхность равна:

$$S_{yi2} = S_{yi1} \frac{1}{2\sqrt[3]{a_{i2}^2}} \left( 1 + \frac{a_{i2}^2}{\sqrt{1-a_{i2}^2}} \ln \frac{1+\sqrt{1-a_{i2}^2}}{a_{i2}} \right) \quad (9)$$

Для удлиненных зерен, аппроксимируемых вытянутым эллипсоидом вращения, получим:

$$S_{yi3} = S_{yi1} \frac{\sqrt[3]{a_{i3}}}{2} \left( \frac{1}{a_{i3}} + \frac{a_{i3}}{\sqrt{a_{i3}^2-1}} \arcsin \frac{\sqrt{a_{i3}^2-1}}{a_{i3}} \right) \quad (10)$$

Для угловатых частиц, аппроксимируемых прямоугольным параллелепипедом, при произвольных значениях  $a_{ij}$  удельная поверхность определяется соотношением:

$$S_{yij} = 0.414 S_{yi1} \frac{1+2a_{ij}}{\sqrt[3]{a_{ij}^2}} \quad (11)$$

Скорость эксхалляции радона зернами сыпучего материала также зависит от их размера и формы. Так для изометрических зерен, имеет место формула:

$$E_{i1} = \frac{2\varepsilon DC_{\max}}{\bar{\delta}_i} \left( \frac{\bar{\delta}_i}{2L} \operatorname{cth} \left( \frac{\bar{\delta}_i}{2L} \right) - 1 \right), \quad (12)$$

где  $\varepsilon$  – пористость материала,  $D$  – коэффициент диффузии радона в поровом пространстве материала ( $\text{м}^2/\text{с}$ ),  $C_{\max}$  – наибольшая возможная концентрация радона в поровом пространстве материала ( $\text{Бк}/\text{м}^3$ ),  $L$  – длина диффузии радона ( $\text{м}$ ) (табл. 1).

Для плоских зерен скорость эксхалляции имеет вид:

$$E_{i2} = \frac{\varepsilon DC_{\max}}{L} \operatorname{th} \left( \frac{\delta_{ax}}{2L} \right) \quad (13)$$

Выразив толщину зерна  $\delta_{ax}$  через его эквивалентный диаметр и коэффициент анизотропии приведем формулу (13) к виду:

$$E_{i2} = \frac{\varepsilon DC_{\max}}{L} \operatorname{th} \left( \frac{a_{i2}^{2/3} \bar{\delta}_i}{2L} \right) \quad (14)$$

Аналогично выводится формула для скорости эксхалляции удлиненных зерен:

$$E_{i3} = \frac{\varepsilon DC_{\max} \delta_{ac}}{4L^2} = \frac{\varepsilon DC_{\max} \bar{\delta}_i}{4L^2 a_{i3}^{1/3}} \quad (15)$$

Для зерен сыпучих строительных материалов выполняется условие  $\bar{\delta}_i/L \ll 1$ , которое с помощью разложений

$$\operatorname{th} x = x - \frac{x^3}{3} + \dots, \quad x \cdot \operatorname{cth} x = 1 + \frac{x^2}{3} - \dots$$

позволяет привести формулы для скорости эксхалляции радона к следующему единому виду:

$$E_{ij} = \frac{\varepsilon DC_{\max} \bar{\delta}_i}{L^2} F(a_{ij}) \quad (16)$$

где

$$F(a_{ij}) = \begin{cases} 0,5a_{ij}^{2/3}, & a_{ij} < 0,2 \\ 0,167, & 0,2 \leq a_{ij} \leq 4 \\ 0,25/a_{ij}^{1/3}, & a_{ij} > 4 \end{cases}$$

График зависимости  $F(a)$  представлен на рис. 1.

Из представленного графика следует, что наибольшую скорость эксхалляции радона имеют изометрические зерна.

Количество активности, выделяемой в производственное помещение перерабатываемым сыпучим материалом определяется следующим выражением:

$$G_A = \frac{m\varepsilon DC_{\max}}{L^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 \bar{\delta}_i \Delta \bar{D}_{ij} S_{yij} F(a_{ij}) \quad (17)$$

где  $m$  – масса находящегося в помещении материала ( $\text{кг}$ ).

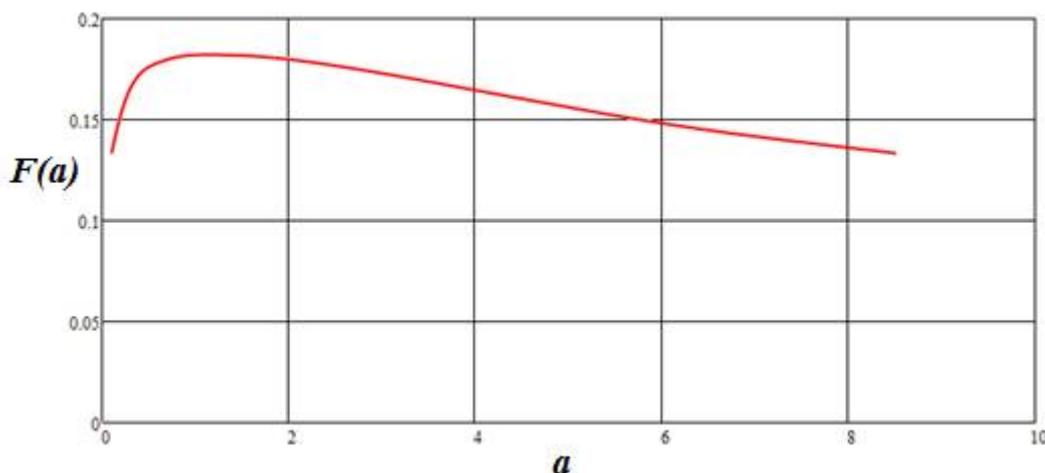


Рис. 1. Зависимость скорости эксхалляции радона от формы зерна минерала:  $a < 1$  – плоские;  $a \approx 1$  – изометрические;  $a > 1$  – удлинённые зерна.

В результате естественной и механической вентиляции производственного помещения, внутри него с течением времени устанавливается стационарное распределение концентрации радона. Среднее значение концентрации объемной активности радона можно оценить с помощью следующего уравнения баланса:

$$G_A + \sum_k R_k S_k + C_{in} \frac{G_v}{\rho_{in}} = C \frac{G_v}{\rho} + \lambda C V, \quad (18)$$

где  $E_k$  – скорость эксхалляции радона для  $k$ -ой внутренней поверхности помещения (Бк/(м<sup>2</sup>с));  $S_k$  – площадь  $k$ -ой поверхности (м<sup>2</sup>);  $C_{in}$  – концентрация активности радона в приточном воздухе, Бк/м<sup>3</sup>;  $G_v$  – производительность естественной и механической вентиляции (кг/с);  $\rho_{in}$ ,  $\rho$  – плотность приточного воздуха и воздуха, находящегося внутри помещения (кг/м<sup>3</sup>);  $V$  – внутренний объем помещения (м<sup>3</sup>);  $C$  – объемная активность радона в помещении (Бк/м<sup>3</sup>).

Из уравнения (17) для усредненной по всему внутреннему объему помещения концентрации активности радона получим:

$$C = \frac{\sum_k R_k S_k + G_A + C_{in} G_v / \rho_{in}}{G_v / \rho + \lambda V}. \quad (19)$$

Из уравнения (17) можно получить также выражение для производительности вентиляции, необходимой для поддержания в помещении концентрации радона на заданном уровне.

$$G_v = \frac{G_A + \sum_k E_k S_k - \lambda V C}{C / \rho - C_{in} / \rho_{in}} \quad (20)$$

В действительности распределение концентрации радона внутри помещений неоднородно. Повышенная концентрация активности может накапливаться в слабо проветриваемых, застойных зонах помещений, вблизи технологического оборудования, стен и полов [5]. В связи с этим кроме поддержания на рекомендуемом уровне средней концентрации активности необходим

также контроль концентрации активности на рабочих местах.

**Заключение.** В статье рассмотрены основные факторы формирования радиационного фона цехов предприятий стройиндустрии: выделение радона перерабатываемым сыпучим материалом и вентиляция цеха. Установлено влияние формы зерен сыпучего материала на величину его удельной поверхности и скорость эксхалляции радона. Для количественной оценки степени этого влияния предложены коэффициент анизотропии зерен и разделение сыпучего материала на фракции не только по размерам частиц, но и по их форме. Получены более точные выражения для средней объемной концентрации активности радона при заданном массовом расходе перерабатываемого материала и выражение для расчета производительности вентиляции цеха достаточной для поддержания в нем концентрации активности радона на рекомендуемом уровне. Приведенные выше аналитические выражения составляют математическую модель формирования радиационного фона помещения, позволяющую выбрать оптимальный способ снижения степени радонового облучения работников.

#### Выводы.

1. При проектировании вентиляции цехов предприятий промышленности строительных материалов необходимо учитывать эманаацию радона перерабатываемым в цехах сыпучим материалом.

2. Количество радона, выделяемого сыпучим материалом зависит не только от его массового расхода, но и от формы его зерен, которая оказывает влияние на величину удельной поверхности материала и на скорость эксхалляции радона.

3. Для количественной оценки влияния формы зерен материала на эманаацию радона

может быть использован коэффициент анизотропии зерен материала и более детальное разделение материала на фракции не только по размерам зерен, но и по их форме.

4. Основными средствами управления радиационным фоном являются изменение технологии переработки сыпучего минерального сырья, специальная обработка внутренних поверхностей ограждающих конструкций, достаточно производительная и правильно организованная вентиляция помещений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. International Commission on Radiological Protection, 1987. Lung cancer risk from indoor ex-

posures to Radon daughters. ICRP Publication 50. Annals of the ICRP 17(1). Pergamon Press, Oxford.

2. Нормы радиационной безопасности. СП 2.6.1.758-99. Министерство здравоохранения России, 1999. 65 с.

3. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 120 с.

4. Шаптала В.Г., Шаптала В.В., Ветрова Ю.В. Математическое моделирование радиационно-экологических свойств строительных материалов и конструкций. Белгород. Изд-во БГТУ, 2008. 58 с.

5. Ветрова Ю.В., Шаптала В.Г., Радоуцкий В.Ю., Шаптала В.В. Моделирование выделения радона из плоских строительных конструкций// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. №4. С. 29-33.

---

**Shaptala V.G., Shaptala V.V.**

#### **MATHEMATICAL MODEL OF REGULATION BACKGROUND RADIATION PRODUCTION FACILITIES CONSTRUCTION ENTERPRISES**

*The regularities of radon emission particulate mineral raw materials on which the mathematical model of the radiation background of industrial premises, which allows to choose the best way to reduce the concentration of radon activity.*

**Key words:** *Mathematical modeling, granular material, radon emanation, the distribution of grain size of the material and shape parameters of the ventilation system.*