

УДК 699.8:546.7

*М.И. ЛИВШИЦ, канд. физ.-мат. наук, Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета при Высшей школе экономики (МИЭМ НИУ ВШЭ); Л.А. ГУЛАБЯНЦ, д-р техн. наук, А.А. ЦАПалОВ, канд. техн. наук, Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (Москва)*

## Метод определения радонопроницаемости материалов ограждающих конструкций зданий

*Приведено решение системы уравнений нестационарного диффузионного переноса радона в испытуемом образце строительного материала. Решение представляет основу нового метода экспериментального определения коэффициента диффузии радона в материале.*

**Ключевые слова:** радон, коэффициент диффузии, метод определения, строительные материалы, теория метода.

Для расчета требуемых параметров противорадоновой защиты подземных ограждающих конструкций зданий необходимы данные коэффициентов диффузии радона в материалах конструкций. Известные методы [1–4] определения этой характеристики обладают рядом недостатков. Главные из них: длительное время эксперимента; нарушение структуры и, следовательно, свойств исследуемого материала в процессе пробоподготовки; изменение состояния, например влажности, исследуемой пробы в процессе эксперимента; недостаточная точность получаемого результата.

Ниже описывается разработанный в НИИСФ РААСН метод, ближайшим прототипом которого является опубликованный в [5] метод измерения коэффициента диффузии радона в тонких мембранах. Принцип измерения заключается в регистрации во времени снижения начального значения объемной активности радона  $C_0$  в камере, одна из стенок которой выполнена из материала испытуемой мембраны (рисунок). В процессе эксперимента снижение ак-

тивности радона в камере происходит вследствие его распада, а также диффузии через мембрану в окружающее пространство. Искомое значение коэффициента диффузии радона  $D$  м<sup>2</sup>/с в пробе определяется по формуле, полученной из решения уравнения нестационарного переноса радона через мембрану при условии, что толщина мембраны достаточно мала и не превышает установленного значения.

Принятое в [5] условие существенно ограничивает применимость метода и снижает точность получаемого результата. В данной статье приводится решение рассматриваемой задачи, полученное без упомянутого ограничения. Поставленная задача сводится к решению системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial C_1(\tau)}{\partial \tau} = -\lambda C_1(\tau) - \frac{S}{V} \alpha_1 [C_1(\tau) - C_2(0, \tau)]; \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C_2(x, \tau)}{\partial x^2} - \lambda C_2(x, \tau) \quad (2)$$

$$\text{для } 0 \leq x \leq h, \quad 0 \leq \tau < \infty$$

при начальных и граничных условиях:

$$C_1(0) = C_0; \quad (3)$$

$$C_2(x, 0) = 0; \quad (4)$$

$$-D \frac{\partial C_2(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_1 [C_1(\tau) - C_2(0, \tau)]; \quad (5)$$

$$-D \frac{\partial C_2(h, \tau)}{\partial x} = \alpha_2 [C_2(h, \tau) - C_3], \quad (6)$$

где  $C_1(\tau)$ ,  $C_2(x, \tau)$  и  $C_3$  – объемная активность радона в камере, образце и окружающем воздухе соответственно, Бк/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время, с;  $\lambda$  – постоянная распада радона,  $2,1 \cdot 10^{-6}$  с<sup>-1</sup>;  $S$  – площадь поперечного сечения камеры и пробы испытуемого материала, м<sup>2</sup>;  $V$  – объем камеры, м<sup>3</sup>;  $h$  – толщина пробы, м;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты, учитывающие условия

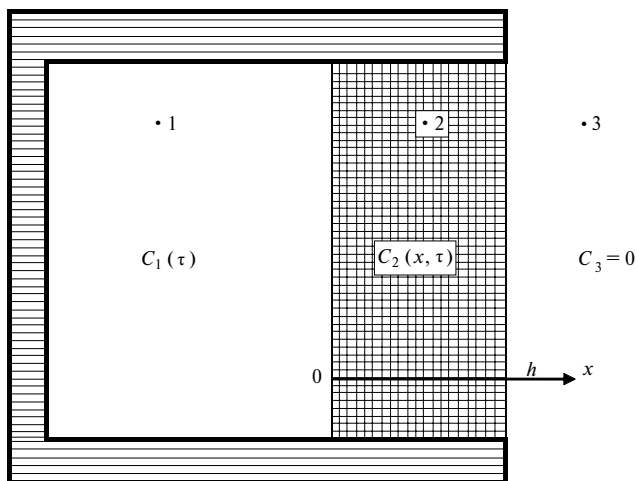


Схема к постановке задачи, представленной уравнениями (1)–(6): 1 – измерительная камера экспериментальной установки объемом  $V$  с площадью поперечного сечения  $S$ ; 2 – проба испытуемого материала толщиной  $h$ ; 3 – окружающий воздух

газообмена в пограничном слое на границах раздела сред воздух – образец у левой ( $x = 0$ ) и правой ( $x = h$ ) поверхностей образца соответственно, м/с.

Решение системы уравнений (1)–(6) относительно функции  $C_1(\tau)$  имеет вид:

$$C_1(\tau) = C_0 \left[ \int_0^\tau e^{\lambda(t-\tau)} F(t) dt + e^{-\lambda\tau} \right]. \quad (7)$$

Входящие в (7) выражения вычисляются последовательно по следующим формулам:

$$H_1 = \frac{\alpha_1}{D}, \quad H_2 = \frac{\alpha_2}{D};$$

$$\beta_1 = \frac{H_1 H_2}{h H_1 H_2 + H_1 + H_2}, \quad \beta_2 = -\frac{H_1 (h H_2 + 1)}{h H_1 H_2 + H_1 + H_2};$$

$$\varphi(x) = \beta_1 x + \beta_2, \quad x \in [0; h].$$

$$\operatorname{tg} \mu_i h = \frac{(H_1 + H_2) \mu_i}{\mu_i^2 - H_1 H_2}, \quad i = 1, 2, \dots$$

$$q_0 = \lambda, \quad q_i = D \mu_i^2 + \lambda, \quad i = 1, 2, \dots$$

$$g_i = -\frac{(\mu_i \beta_1 h H_1 + \mu_i \beta_2 H_1 - \mu_i \beta_1) \cos(\mu_i h) - (\mu_i^2 \beta_2 + \mu_i^2 \beta_1 h + \beta_1 H_1) \sin(\mu_i h) + \mu_i (\beta_1 - \beta_2 H_1)}{\mu_i^3};$$

$$l_i = \frac{\mu_i^4 h + \mu_i^2 (h H_1^2 + h H_2^2 + H_1 + H_2) + H_1 H_2 (H_1 + H_2 + h H_1 H_2)}{2(H_2^2 + \mu_i^2) \mu_i^2}, \quad i = 1, 2, \dots$$

$$d_0 = -(1 + \beta_2), \quad d_i = \frac{g_i}{l_i}, \quad i = 1, 2, \dots$$

$$A_0(x) = -\varphi(x), \quad A_i(x) = d_i \left( \cos \mu_i x + \frac{H_1}{\mu_i} \sin \mu_i x \right), \quad i = 1, 2, \dots$$

$$K(t, \tau) = \frac{S \alpha_1}{V} \sum_{i=0}^{\infty} d_i e^{q_i(t-\tau)}, \quad P(\tau) = \frac{S \alpha_1}{V} \sum_{i=0}^{\infty} d_i \cdot e^{-q_i \tau};$$

$$F_0(\tau) = P(\tau), \quad F_k(\tau) = \int_0^\tau K(t, \tau) F_{k-1}(t) dt, \quad k = 1, 2, \dots$$

$$F(\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} F_k(\tau).$$

Для проведения вычислений авторы использовали компьютерную математическую программу Maple.

В процессе испытаний пробы в камере экспериментальной установки с определенным шагом по времени измеряются значения объемной активности радона  $C_1(\tau)_{\text{эксп}}$ .

Изменение активности радона в камере  $C_1(\tau)_{\text{расч}}$  при заданном значении коэффициента диффузии рассчитывается на основании (7). Величина коэффициента диффузии радона в испытуемой пробе определяется с помощью метода наименьших квадратов, примененного к функции  $C_1(\tau)_{\text{эксп}}$  при известном виде функции  $C_1(\tau)_{\text{расч}}$ .

Приведенный метод пригоден для определения объемного коэффициента диффузии радона в пробах любой толщины, что важно для исследования свойств таких неоднородных материалов, как горные породы, грунты, бетоны и т. п. Время одного определения при этом не превышает 18 часов. Диапазон измерения определяемой величины составляет от  $10^{-5}$  (воздух) до  $10^{-12}$  (практически непроницаемый для радона материал) м<sup>2</sup>/с. При достаточно большой толщине пробы и нанесении влагонепроницаемого покрытия на ее внешнюю поверхность данный метод позволяет определять коэффициент диффузии в пробах с различными влажностными состояниями с их сохранением в процессе эксперимента практически неизменными.

## Список литературы

1. Hulka J. Determination of Radon Diffusion Coefficient of Radon Barriers. // Radon Investigation in the Czech Republic YI and the Third International Workshop. Czech Geological Survey Radon corp. 1996, Pp. 124–127.
2. Jiranek M. et al. Radon diffusion coefficient – a material property determining the applicability of waterproof membranes as radon barriers // Proceedings of the American Association of Radon Scientists and Technologists 2008. International Symposium Las Vegas NV. 2008. September 14–17.
3. Kovler K., Perevalov A., Steiner, V., Rabkin, E. Determination of the Radon diffusion length in building materials using electrets and activated carbon. // Health Physics. 2004. V. 86. № 5. Pp. 505–516.
4. Folkerts KH, Keller G., Muth H. An experimental study on diffusion and exhalation of <sup>222</sup>Rn and <sup>220</sup>Rn from building materials // Radiation Protection Dosimetry. 1984. 9:27–34.
5. L.S. Quindos Poncela et al. Evaluation of Radon Diffusion Coefficient of Radon Barriers: First Results with a Radon Chamber // Third Eurosymposium on Protection against Radon. Liege. 2001. 10–11 May.