

Теоретическая основа нестационарного метода измерения коэффициента диффузии радона в пористой среде

Согласно нормам радиационной безопасности [1], среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) радона в помещениях зданий не должна превышать установленного предела. В настоящее время инженерные методы расчета ожидаемого значения ЭРОА в помещениях при использовании тех или иных проектных решений отсутствуют.

Л.А. Гулабянц (НИИ Строительной Физики РААСН, г.Москва), М.И. Лившиц (МГИ Электроники и Математики, г.Москва), А.А. Цапалов (НТЦ «Амплитуда», п.Менделеево)

Заключения о достаточности противорадоновой защиты здания на стадии проектирования принимаются на основе экспертных оценок. Обоснованность таких заключений в решающей степени зависит от квалификации и опыта эксперта, а также от объема и содержания располагаемой им информации об условиях строительства.

Вместе с тем, создание инженерного метода расчета, позволяющего достоверно оценивать уровни ЭРОА в помещениях будущего здания при различных вариантах проекта, не представляет особой сложности. Метод расчета радонового баланса здания при известных усредненных расчетных значениях определяющих факторов может быть ничуть не сложнее, чем десятки лет используемые в строительной практике методы проектного расчета теплового, воздушного, влажностного и других режимов.

Однако практическое использование любого метода расчета

ЭРОА в зданиях оказывается невозможным при отсутствии представительных исходных данных, которые должны быть использованы в расчете. В том числе и прежде всего, данных об эффективном коэффициенте диффузии радона в грунтах основания здания и материалах его ограждающих конструкций. В последние десятилетия опубликовано крайне мало оригинальных работ, посвященных методам определения и, собственно, экспериментальному определению этой величины, а опубликованные данные весьма противоречивы. Причина этого заключается, в частности, в отсутствии стандартизованного метода и аппаратуры для определения коэффициента диффузии радона при малых затратах времени и с приемлемой точностью.

Главные недостатки известных методов [2-11]:

- длительное время эксперимента;
- неизбежное при проведении эксперимента нарушение структу-

ры исследуемого образца;

- изменение состояния (например, влажности и плотности) исследуемого образца в процессе эксперимента;
- большая погрешность.

В связи с этим значительный практический интерес представляет описанный в [12] метод измерения коэффициента диффузии радона в тонких мембранах в нестационарном режиме переноса. Показанный в [12] метод основан на измерении снижения во времени заданного начального значения объемной активности радона в модифицированной камере Лукаса объемом, одна из стенок которой ограничена образцом испытываемой мембраны. Снижение активности происходит, частично, вследствие распада радона в камере и, частично, вследствие его диффузии через мембрану в окружающее пространство. Искомое значение коэффициента диффузии радона D (m^2/c) определяется по формуле

$$D = \left[\frac{Vh}{S(\tau_2 - \tau_1)} \right] \ln \left[\frac{C_0 \exp(-\lambda(\tau_2 - \tau_1))}{C(\tau_2) - C(\tau_1)} \right], \quad (1)$$

где S – площадь образца, m^2 ; V – объем камеры, m^3 ; h – толщина мембраны, m ; λ – постоянная распада радона, $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$; τ – время, c ; C_0 – известное начальное значение объемной активности радона в камере, $Bк/m^3$; $C(\tau_1)$, $C(\tau_2)$ – объемная активность радона в камере в моменты времени τ_1 и τ_2 , соответственно, $Bк/m^3$.

Формула (1) получена из решения одномерного уравнения переноса радона через мембрану при следующих условиях:

- объемная активность радона в мембране пренебрежимо мала;
- величина отношения $(V/Sh) \gg 1$, т.е. толщина мембраны пренебрежимо мала по сравнению с глубиной камеры.

В [12] математическая формулировка задачи, к сожалению, не показана. Приводится только ее решение, представленное в виде:

$$C(\tau) = C_0 \cdot \exp \{ -(1 + DS/(\lambda Vh)) \lambda \tau \}. \quad (2)$$

Принятые в [12] допущения накладывают существенные ограничения на применимость метода и снижают точность получаемого результата. Поэтому представляет интерес получение общего решения задачи без упомянутых выше ограничений.

Формулировка поставленной в данной работе задачи имеет вид, представленный на рис.1.

$$\frac{\partial C_1(\tau)}{\partial \tau} = -\lambda C_1(\tau) - \frac{S}{V} \alpha_1 [C_1(\tau) - C_2(0, \tau)], \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C_2(x, \tau)}{\partial x^2} - \lambda C_2(x, \tau). \quad (4)$$

Требуется найти решения $C_1(\tau)$ для $0 \leq \tau < \infty$ и

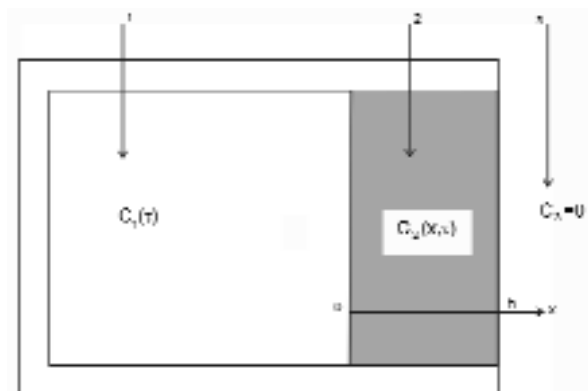


Рисунок 1. Схема к постановке задачи (3)–(8).

1 – камера объемом V с площадью поперечного сечения S ,
2 – образец испытываемого материала толщиной h ,
3 – окружающее пространство.

$C_2(x, \tau)$ для $0 \leq x \leq h$, $0 \leq \tau < \infty$, удовлетворяющие начальным условиям

$$C_1(0) = C_0, \quad (5)$$

$$C_2(x, 0) = 0 \quad (6)$$

и граничным условиям

$$-D \frac{\partial C_2(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_1 [C_1(\tau) - C_2(0, \tau)], \quad (7)$$

$$-D \frac{\partial C_2(h, \tau)}{\partial x} = \alpha_2 [C_2(h, \tau) - C_3]. \quad (8)$$

В системе уравнений (3)–(8) приняты обозначения: $C_1(\tau)$, $C_2(x, \tau)$ и C_3 – объемная активность радона в камере, образце и окружающем воздухе, соответственно, $Bк/m^3$; α_1 , α_2 – коэффициенты, учитывающие условия газообмена в пограничном слое на границах раздела сред “воздух” – “образец” у левой ($x = 0$) и правой ($x = h$) поверхностей образца, соответственно, m/c ;

Решение (3)–(8) имеет вид:

$$C_1(\tau) = C_0 \left[\int_0^\tau e^{\lambda(t-\tau)} F(t) dt + e^{-\lambda\tau} \right]. \quad (9)$$

$$C_2(x, \tau) = C_0 \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ A_i(x) \cdot e^{-q_i \tau} \cdot \left[1 + \int_0^\tau e^{q_i t} F(t) dt \right] \right\}. \quad (10)$$

Входящие в (9)–(10) выражения вычисляются в следующей последовательности:

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

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

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

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

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

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

$$l_i = \frac{\mu_i^4 h + \mu_i^2 (h H_1^2 + h H_2^2 + H_1 + H_2)}{2(H_2^2 + \mu_i^2) \mu_i^2} +$$

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

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

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

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

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

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

Для проведения вычислений авторами использована математическая программа «Maple 8».

На рисунке 2 показаны результаты расчетов, проведенных по формулам (2) и (9). Из рисунка 2а можно видеть, что при достаточно малой толщине образца ($h = 0,001$ м) результаты расчетов полностью совпадают. При больших значениях этой величины, например, 0,2 м (рис.2б) из-за принятых в

[12] упрощений расхождение становится значительным.

Приведенное в данной статье решение может быть использовано для определения эффективного коэффициента диффузии радона в образцах любой толщины, что совершенно необходимо при исследовании таких материалов как, например, горные породы, грунты и стеновые строительные материалы. Кроме того, при закрытой внешней поверхности образца ($\alpha_2=0$) данное решение позволяет проводить исследования при различных влажностных состояниях образца с сохранением этого состояния в процессе эксперимента практически неизменным.

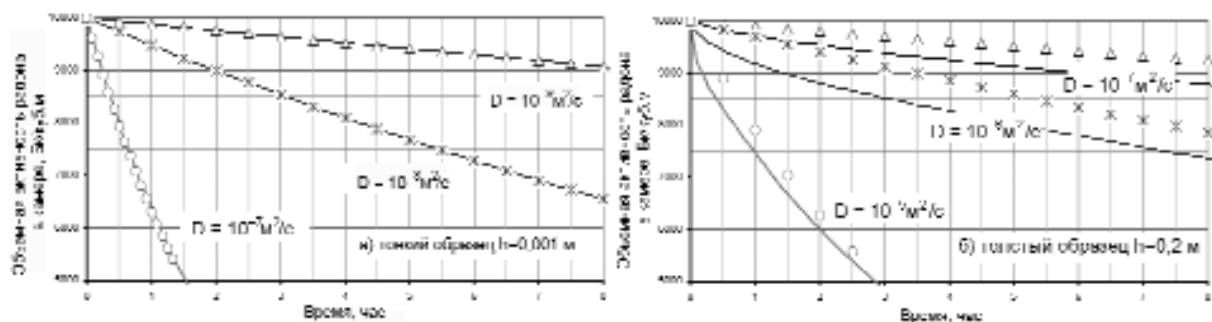


Рисунок 2. Значения объемной активности радона $C_1(\tau)$ в камере ($V = 0,001$ м³, $S = 0,00126$ м²), рассчитанные по формулам (2) и (9) (маркированные точки и сплошные линии, соответственно) при различных значениях коэффициента диффузии радона.

Литература

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). Минздрав России, 1999.
2. А.С.Сердюкова, Ю.Т.Капитанов. Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе. Москва, 1969.
3. В.А.Шашкин, М.И.Пруткина. Эманирование радиоактивных руд и минералов. Москва, Атомиздат, 1979.
4. В.М.Бондаренко, Н.В.Демин, В.С.Рогалис. Противорадоновая защита в жилых и общественных зданиях. АНРИ, №1(40), 2005.
5. K.Kovler et.al. Determination of the Radon diffusion length in building materials using electrets and activated carbon. Health Physics, v.86, №5, 2004.
6. Culot M.V.J, Olson H.G., Schiager K.J. Effective diffusion coefficient of radon in concrete, theory and method for field measurements. Health Physics, v.40, 263-270, 1979.
7. Folkerts KH, Keller G., Muth H. An experimental study on diffusion and exhalation of ²²²Rn and ²²⁰Rn from building materials. Radiation Protection Dosimetry. v.9, 27-34, 1984.
8. Prichard H.M., Marien K. A passive diffusion ²²²Rn sampler based on activated carbon adsorption. Health Physics, v.48, 797-803, 1985.
9. Tanner A.B. Radon migration in the ground, a review. The National Radiation Environment, University of Chicago Press, 1964.
10. Zapalac G.H. A time-dependent method for characterizing the diffusion of Rn-222 in concrete. Health Physics, v.45, 377-383, 1983.
11. G.Akerblom et.al. Radon i bostader. Markradon. Bygghforskningradet. R85, 1988.
12. 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, 10 and 11 May 2001. Proceedings.