

Summary

A method for determining the coefficient of air permeability of building materials using the rarefaction method is proposed. An analytical formula for its calculation is derived.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zhang D., Li K., (2019) Concrete gas permeability from different method: Correlation analysis. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 103379, doi: 10.1016/j.cemconcom.2019.103379
2. ДСТУ EN ISO 9972:2022. Теплотехнічні характеристики будівель. Визначення повітропроникності будівель. Метод випробувального тиску – К: 2021 (державний стандарт України).
3. ДСТУ Б В.2.6-37:2008 Методи визначення показників повітропроникності огорожувальних конструкцій і їх елементів у лабораторних умовах. – К: Мінрегіонбуд України, 2009, 13 с. (державний стандарт України)
4. Mandip Dahal , Sungwoo Park , Sukhoon Pyo. A modified approach for measuring the air permeability of ultra-high performance concrete (UHPC) under vacuum conditions. *Construction and Building Materials*, 2023, v.401, 132933, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132933

УДК 624.01

ПРО ПОХИБКУ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТУ МАСОВОЇ ПОВІТРОПРОНИКНОСТІ МЕТОДОМ ЗМІННОГО РОЗРІДЖЕННЯ.

студ. Ткач Є.М., Ткаченко Є.М., гр. БЦІ-202

Наукові керівники Рімашевський О.А., к.ф.-м.н. доц. Загинайло І.В..

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Актуальність дослідження. На кафедрі фізики ОДАБА розробляється установка для вимірювання коефіцієнту повітропроникності будівельних матеріалів методом розрідження. Оцінювання похибки вимірювання цією установкою є важливою задачею для використання проекрованої установки в наукових дослідженнях.

Стан проблеми. В попередній роботі [1] встановлено розрахункову формулу для коефіцієнту повітропроникності, який вимірюється методом розрідження:

$$\eta = 3600 \frac{\mu}{RT} \cdot \frac{V\delta}{S} k_1, \quad (1)$$

де R – універсальна газова стала, μ – середня молярна маса повітря, T – абсолютна температура повітря в камері об'ємом V , δ – товщина зразка матеріалу, що вивчається, S – робоча площа зразка, яка дорівнює площі вікна у фланці робочої камери, k_1 – коефіцієнт лінійної апроксимації логарифмічної залежності перепаду тиску від часу t між камерою та зовнішнім повітрям:

$$\ln\left(\frac{\Delta p(t)}{\Delta p_0}\right) = k_0 + k_1 t. \quad (2)$$

Мета роботи. На підставі теорії похибок [2, 3] отримати розрахункову формулу для оцінювання похибки визначення коефіцієнту повітропроникності.

Отримані результати.

Для універсальної газової сталої відоме точне значення: $R = 8,31446261815324$ Дж/(моль·К). Таким чином за формулою оцінювання похибки непрямих вимірювань методом переносу,

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \eta}{\bar{\eta}} &= \left[\left(\frac{\partial \ln \eta}{\partial \mu} \Delta \mu \right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \eta}{\partial T} \Delta T \right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \eta}{\partial V} \Delta V \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial \ln \eta}{\partial S} \Delta S \right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \eta}{\partial \delta} \Delta \delta \right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \eta}{\partial k_1} \Delta k_1 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\Delta \mu}{\bar{\mu}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{\bar{T}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{\bar{V}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{\bar{S}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \delta}{\bar{\delta}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta k_1}{\bar{k}_1} \right)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

Молярна маса повітря, що не містить вологи, становить $\mu_{da} = 0,02897$ кг/моль, відносна похибка цієї величини становить 0,00035. Однак, у реальних умовах вимірювань є волога. Таким чином, для вимірювання розрахунку повітропроникності за формулою (1) необхідно вимірювати вологість повітря і коригувати його молярну масу.

Сучасні цифрові вимірювачі вологості повітря (наприклад, GM1360A, VC231, UT333) мають похибку вимірювання вологості від 3% до 5% залежно від

діапазону вимірювання та наявності аспіратора. Оцінимо вплив помилки вимірювання вологості на похибку визначення молярної маси вологого повітря, прийнявши похибку вимірювання вологості, що дорівнює 3%.

Нехай результат виміру відносної вологості повітря становить $R_h\%$. Відносна вологість виражена у % від тиску насиченої пари води при температурі вимірювання. Залежність тиску насиченої пари води від температури повітря відома, у табличному вигляді її можна знайти, наприклад, у ДСТУ Н.Б.В 2.6:2013 [4]. Ця залежність для температур вище 0°C може бути апроксимована за допомогою формули Бака [5]:

$$E(T') = 611,21 \exp \left(\left(18,678 - \frac{T'}{234,5} \right) \cdot \frac{T'}{257,14 + T'} \right), \quad (4)$$

де температура T' вказана в $^\circ\text{C}$, тобто відрізняється від абсолютної на 273,15 К. В області температур T' від 0°C до 40°C відносна похибка розрахунку за формулою Бака не перевищує 0,5% [5].

Парціальний тиск водяної пари у повітрі обчислюється, як

$$e_h(T') = R_h \cdot E(T'). \quad (5)$$

Таким чином, можна оцінити похибку визначення e_h як

$$\frac{\Delta e_h}{\bar{e}_h} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_h}{\bar{R}_h} \right)^2 + \left(\frac{\Delta E}{\bar{E}} \right)^2} = \sqrt{(0,03)^2 + (0,005)^2} \approx 0,03, \quad (6)$$

тобто, ця похибка практично повністю визначається похибкою приладу вимірювання відносної вологості.

Парціальний тиск пари води в атмосферному повітрі перерахуємо на масовий вміст вологи. У 1 м^3 об'єму маса пари води m_h складе

$$m_h = \frac{e_h \mu_h}{RT}, \quad (7)$$

де μ_h молярна вага води, що дорівнює $0,01801528(3)$ кг/моль. Маса сухого повітря m_{da} у цьому ж об'ємі становитиме

$$m_{da} = \frac{(p_a - e_h) \mu_{da}}{RT}, \quad (8)$$

де p_a – тиск атмосфери зовні камери.

Масова частка води ϕ в загальній масі повітря при тиску p_a складатиме

$$\phi = \frac{m_h}{m_{da} + m_h} = \frac{e_h \mu_h}{p_a \mu_{da} - e_h (\mu_{da} - \mu_h)}. \quad (9)$$

Похибка визначення масової частки води ϕ буде визначатися, як видно з формули (9), похибкою вимірювання атмосферного тиску та похибкою визначення e_h ; похибками μ_h та μ_{da} у порівнянні з ними можна знехтувати. Відносна похибка вимірювання атмосферного тиску метеорологічним барометром-анероїдом БАММ-1 складає 0,002, що значно менше відносної похибки e_h . Таким чином, похибку ϕ можна оцінювати приблизно як

$$\frac{\Delta \phi}{\phi} \approx \sqrt{2} \frac{\Delta e_h}{e_h} \approx 0,042. \quad (10)$$

Молярна повітря з масовою часткою вмісту вологи дорівнюватиме

$$\mu = \mu_{da}(1 - \phi) + \mu_h \phi = \mu_{da} - (\mu_{da} - \mu_h) \phi, \quad (11)$$

звідки похибку μ можна оцінити як

$$\frac{\Delta \mu}{\mu} \approx \frac{\mu_{da} - \mu_h}{\mu_{da}} \cdot \frac{\Delta \phi}{\phi} \approx 0,016. \quad (12)$$

Абсолютну похибку вимірювання температури електронним термометром-гігрометром приймаємо у $0,1^\circ$, або у відносному форматі – 0,00033.

Похибки об'єму та площі робочої камери обумовлені допусками при виготовленні. Похибку визначення об'єму циліндричної камери визначимо за формулою

$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{\left(\frac{2\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2}, \quad (13)$$

де $D = 132 \pm 0,1$ мм – внутрішній діаметр камери, $H = 150 \pm 0,1$ мм – її глибина.

Таким чином,
$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 0,1}{132}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{150}\right)^2} \approx 0,002.$$

Вікно робочої камери має габарити $(70,7 \pm 0,1) \times (70,7 \pm 0,1)$ мм, таким чином

$$\frac{\Delta S}{S} = \sqrt{2} \left(\frac{0,1}{70,7}\right) \approx 0,002.$$

Похибка вимірювання товщини зразка – це похибка прямого виміру. Основне джерело цієї похибки – неоднорідність товщини зразка. Ця похибка визначається для кожного зразка при вимірі його товщини. Позначимо цю відносну похибку як ζ .

Похибка для коефіцієнта k_1 визначається програмою апроксимації, позначимо її ξ .

Таким чином, похибки всіх величин, що входять у формулу (3), відомі, і похибка визначення коефіцієнта повітропроникності дорівнюватиме

$$\frac{\Delta\eta}{\bar{\eta}} \approx \sqrt{0,00027 + \zeta^2 + \xi^2} \quad (14)$$

Висновки. Отримана формула (14) для оцінювання відносної похибки вимірювання коефіцієнту повітропроникності будівельних матеріалів методом розрідження в припущенні певних похибок вимірювання температури, тиску повітря та його вологості, яка включає відносні похибки вимірювання товщини зразків та визначення коефіцієнту апроксимації (2) в якості параметрів.

Summary

The measurement error of the air permeability factor in the method of air leakage into a chamber with reduced pressure is analyzed. The measurement errors of the sample thickness and the leakage time constant are considered as parameters. It is shown that the measurement error of air humidity is dominant among other factors. A working formula for calculating the measurement error is obtained.

ЛІТЕРАТУРА

1. Громова Д.Д., Сагайдак С.В. Вимірювання коефіцієнту повітропроникності методом розрідження. / Фізичні основи сучасних технологій в будівельній індустрії. Тези доп. VII Всеукр. наук.-практ. конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених – Одеса: ОДАБА, 2025. С. 72–75.
2. Ужва В. І., Пугач О. В. Теорія похибок / К: КПІ ім. І.Сикорського, 2017, 12 с.
3. Гасюк І.М., Кайкан Л.С. Статистичні методи обробки результатів фізичного експерименту. Навчальний посібник. – Івано-Франківськ: Видавництво Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2011.- 159 с.
4. Настанова з розрахункової оцінки тепловологісного стану огорожувальних конструкцій: ДСТУ-Н Б В.2.6-192:2013. /– К.: Мінрегіон України, 2014. – 37 с. – (Національний стандарт України).
5. Arden L. Buck. New Equations for Computing Vapor Pressure and Enhancement Factor / *J. Appl. Meteorol.*, 1981, v. 20 (№12), P 1527–1532