

УДК 614.841

## ВИМІР ГАЗОПРОНИКНОСТІ ПОРИСТИХ НЕГОРЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ ТЕМПЕРАТУР ДО 800°C МЕТОДОМ ДИНАМІЧНОГО ВИМІРЮВАННЯ

О.Ф. Нікулін\*, д-р техн. наук, А.І. Кодрик, канд. техн. наук, О.М. Тітенко, канд. техн. наук, О.І. Мороз

Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Україна

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 10.04.2018

Пройшла рецензування: 20.06.2018

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

газопроникність, пористі матеріали, метод динамічного вимірювання, гасіння методом ізоляції.

### АНОТАЦІЯ

Запропоновано спеціальний метод вимірів газопроникності пористого матеріалу в умовах високих температур, при якому характер зміни вимірюваних величин в часі є динамічним. Такий підхід дозволяє вимірювати величину коефіцієнта газопроникності пористого матеріалу при температурах до 800 °С. Описано спосіб та лабораторну установку для вимірювання коефіцієнту газопроникності пористого матеріалу за допомогою методу динамічного вимірювання в умовах високих температур. Наведено теоретичне обґрунтування цього методу. Наведена формула для розрахунку коефіцієнту газопроникності описаним методом.

Відомо, що для гасіння пожеж без наявності інтенсивного полуменевого горіння, як то при поверхневих та торф'яних пожежах, можливо використовувати метод ізоляції.

Такі пожежі, як правило, проходять на глибинах залягання не більш ніж 1,5 метра, згорання проходить без наявності інтенсивного полум'яного горіння, причому, вихід гарячих продуктів згорання має локальний характер, створюючи підсос повітря з оточуючої поверхні радіусом до 3-5 м від центру осередка пожежі, тому покриття пористим матеріалом саме цієї периферійної зони підсосу може створити умови для локалізації пожежі. В якості ізолюючого матеріалу можливо використання твердіючих піл, негорючих поропластів та інше [1, 2].

При використанні таких матеріалів, для затримки проникнення кисню при локалізації осередків горіння методом ізоляції для зменшення проникнення повітря в нижні шари і, як наслідок, зменшення ефективності тепловиділення від осередків горіння, важливе значення має їх газопроникність, яка визначає товщину нанесення матеріалів та відповідно економічну доцільність використання методу. Існуючі методи [3], що використовують стаціонарні процеси при вимірюванні газопроникності, не відповідають умовам високих температурних навантажень, характерних для пожежних випробувань такої речовини, як пористий матеріал.

Нами розроблений спеціальний метод, побудований на динамічних процесах при вимірюванні, що дозволяє вимірювати величину коефіцієнта повітропроникності

пористого матеріалу при температурах до 800° С. Метод використовує спеціальну установку та полягає у виконанні запропонованої послідовності дій.

Візуалізація загального вигляду установки показано на рис.1, а схема установки - на рис. 2.

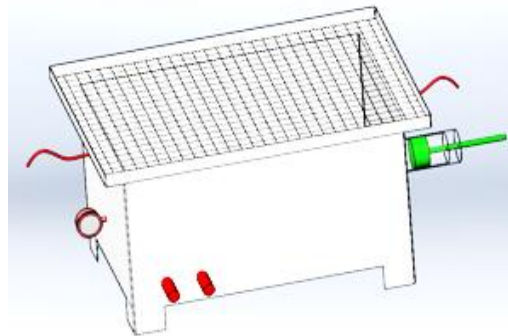


Рисунок 1 – Візуалізація загального вигляду установки вимірювання величини коефіцієнту повітропроникності пористого матеріалу

Принцип вимірювання величини коефіцієнта повітропроникності пористого матеріалу на установці (див. рис.2) полягає в наступному:

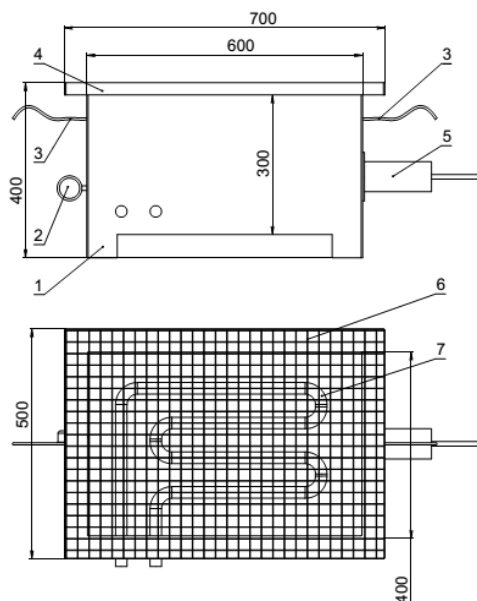
1. Закладка зразка (залівка) пористого матеріалу на донну поверхню ємності поз. 4, що має побудову у вигляді металевої сітки, поз. 6.

2. Підвищення температури у металевому корпусі поз. 1. до необхідної величини і витримка у часі всього обладнання, у тому числі і зразку пористого матеріалу, для

\*E-mail: a.f.nikulin@gmail.com

стабілізації розподілу температури по всій установці включно зі зразком пористого матеріалу.

3. Підвищення абсолютного тиску до сталої величини  $P_0$ .



1 – металевий корпус; 2 – манометр; 3 – термопара (2 поз.); 4 – місце розташування зразку пористого матеріалу; 5 – насос; 6 – металева сітка; 7 – електронагрівач.

Рисунок 2 - Лабораторна установка для випробувальних іспитів пористого матеріалу.

4. Відключення насосу поз. 5 з синхронною фіксацією величини абсолютного тиску  $P_0$  в корпусі поз. 1 та часу  $t_0$  - початковим відліком часу.

5. Витримка установки в такому стані (під час цього буде падати тиск в камері поз. 1) на

протязі деякого фіксованого часу від  $t_0$  до  $t_1$  та синхронна фіксація відповідного (до моменту  $t_1$ ) абсолютного тиску  $P_1$  в камері поз.1 установки.

Для математичного опису фізичних явищ, що відбуваються при функціонуванні установки описаним способом, скористаємося рівняннями, виведеним на основі принципів молекулярно-кінетичної теорії Максвелла [4].

Диференціал об'єму повітря, що виходить скрізь пори пористого матеріалу:

$$dV = -1.02 \cdot 10^{-12} \frac{k_{pen} \cdot A \cdot B}{\mu_{air_T} \cdot H_{por}} \cdot (p(t) - p_a) \cdot dt, \quad (1)$$

де,  $k_{pen}$  - коефіцієнт повітропроникності пористого матеріалу, Д,

$A, B, H_{por}$  - довжина, ширина та висота слою пористого матеріалу, м,

$\mu_{air_T}$  - динамічна в'язкість повітря при температурі вимірювань, Па·с,

$p(t)$  - поточне значення тиску в камері установки, Па,

$p_a$  - величина нормального атмосферного тиску, Па,

$dt$  - диференціал часу, с.

$A$ , також співвідношення між диференціалами тиску та об'єму повітря, що проходить скрізь пори:

$$\frac{dp}{p(t)} = \frac{dV}{V(t)}, \quad (2)$$

Вирішуючи систему цих двох рівнянь (1) та (2) відомими методами [5], отримаємо:

$$p(t) = p_a \cdot \left[ \exp \left( -1.02 \cdot 10^{-12} \frac{k_{pen} \cdot P_0}{\mu_{air_T} \cdot H_{por} \cdot H_{cam}} \cdot (t - t_0) + \ln \left( \frac{P_0 - p_a}{p_a} \right) \right) + 1 \right], \quad (3)$$

де,  $p_0$  - початковий тиск у камері установки в початковий момент часу  $t_0$ ,  
 $H_{cam}$  - висота камери установки,  $t$  - поточний час.

Ілюстрація цього рішення показано на рис. 3. Користуючись знайденою формулою (3), отримаємо значення коефіцієнту

повітропроникності пористого матеріалу даним методом:

$$k_{pen} = 0.98 \cdot 10^{12} \cdot \frac{\mu_{air_T} \cdot H_{por} \cdot H_{cam}}{P_0} \cdot \ln \left( \frac{P_0 - p_a}{p_1 - p_a} \right) \cdot \frac{1}{t_1 - t_0}, \quad (4)$$

де,  $t_1$  - час, який відповідає тиску  $p_1$  у камері установки,  
 $p_1$  - величина абсолютного тиску по показаннях манометру на час  $t_1$ .

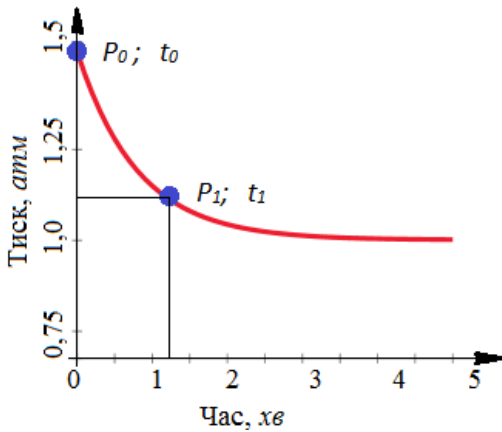


Рисунок 3 - Залежність абсолютного тиску в камері установці від часу

При проведенні вимірювань у нестационарному, або динамічному режимі, виникає важливе питання на якому інтервалі часу треба провадити виміри, щоб похибка результату вимірювання була мінімальна.

Якщо вважати величину коефіцієнту повітропроникності, формула (4), функцією від вимірів тиску  $p_1$  та часу  $t_1$ , тобто:  $k_{pen} = k_{pen}(p_1, t)$ , та похибок синхронних вимірів тиску та часу, отримаємо наступну формулу відносної похибки вимірювання коефіцієнту повітропроникності:

$$\Delta_e k_{pen}(t) = \frac{|k_{pen}(p(t) + \delta p, t)| + |k_{pen}(p(t) - \delta p, t)| + |k_{pen}(p(t), t + \delta t)| + |k_{pen}(p(t), t - \delta t)|}{k_{pen}(t)} \quad (5)$$

де,  $p(t)$  - величина тиску згідно з формулою (3),  
 $\delta p, \delta t$  - похибки вимірів тиску та синхронного виміру часу.

Ця залежність проілюстрована для випадку  $p_0 = 0,15$  МПа,  $p_1 = 0,1$  МПа,  $T_{air} = 400$  °C на рис. 4.

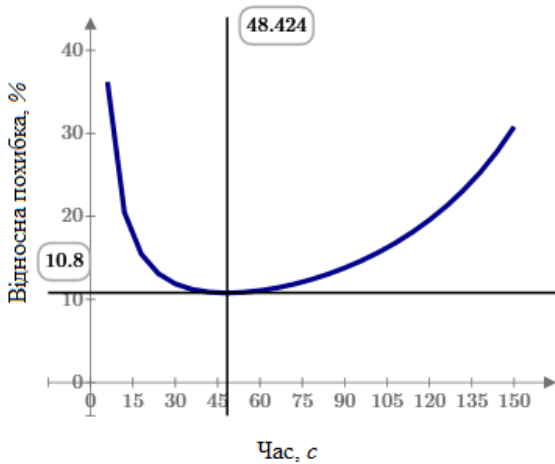


Рисунок 4 – Залежність відносної похибки вимірювання величини коефіцієнту повітропроникності пористого матеріалу від часу

$t_1$ , що синхронно вимірюється з величиною тиску  $p_1$ .

Для знаходження значення часу  $t_1$ , що відповідає мінімуму похибки, треба вирішити наступне рівняння:

$$\frac{d}{dt} (\Delta_e k_{pen}(t_1)) = 0 \quad (6)$$

У зв'язку з незначною залежністю загальної похибки вимірювання від похибки вимірювання часу (у зрівнянні з впливом похибки при вимірюванні величини тиску), підставляємо значення відповідних змінних згідно формулам (3), (4) та (5) без урахування похибки вимірювання часу:

$$\frac{e^{-\frac{k_{pen} p_0 t}{\mu_{air} T_{pen} H_{cam}}} + \ln \left( e^{-\frac{k_{pen} p_0 t}{\mu_{air} T_{pen} H_{cam}}} + \frac{\delta p}{p_0 - p_a} \right) \mu_{air} T_{pen}^2 H_{cam}^2}{\left( e^{-\frac{k_{pen} p_0 t}{\mu_{air} T_{pen} H_{cam}}} + \frac{\delta p}{p_1 - p_a} \right) k_{pen} p_0 t} + \frac{\mu_{air} T_{pen}^2 H_{cam}^2}{k_{pen}^2 p_0^2 t^2} = 0; \quad (7)$$

Для вирішення цього рівняння спочатку знаходимо многочлен Тейлора функції, що

стоїть у правій частині формули (6) у точці очікуваного часу, потім прирівнюємо

отриманий многочлен нулю та вирішуємо його відносно змінної  $t$ .

$$t = 0.98 \cdot 10^{12} \frac{\mu_{air} \cdot H_{por} \cdot H_{cam} \cdot \delta p}{k_{pen} \cdot P_0 \cdot (P_0 - P_a)}, \text{ с,}$$

З досвіду використання цього способу вимірювання, такої точності оцінки часу  $t_1$  цілком достатньо. Наприклад, для випадку  $H_{por} = 10$  мм,  $H_{cam} = 400$  мм,

$k_{pen} = 5,3 \times 10^{-3}$  Д,  $P_0 = 0,15$  МПа при температурі повітря  $400^\circ \text{C}$ , та  $\delta p = 0,001$  МПа,  $\delta t = 0,01$  с (похибки вимірів тиску та синхронного виміру часу), було обраховано значення  $t_1$  за допомогою рівняння (6):  $t_1 = 48,424$  с (див. Рис.4), та за допомогою формули (8):  $t_1 = 48,73$  с. Обидва значення досить близькі за величиною, що підтверджує можливість використання запропонованого методу для вимірювання коефіцієнту повітропроникності пористого матеріалу методом динамічного вимірювання в умовах високих температур.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ГОСТ Р 51263-2012 «Полимербетон. Технические условия».
2. Пантелеенко В.Н. Строительные материалы/ В.Н. Пантелеенко, Л.А. Ерохина, Е.М. Верякина. Ухта – 2012, - 42 с.

#### Висновки

1. Запропонований спосіб вимірювання коефіцієнту повітропроникності пористого матеріалу методом динамічного вимірювання і установки для його використання дозволяють достовірно моделювати процес горіння та знаходити значення коефіцієнту повітропроникності при різних значеннях температури та тиску.

2. Отримані формули для розрахунку коефіцієнту повітропроникності пористого матеріалу за описаним способом, а також, розрахункові та експериментальні значення коефіцієнту повітропроникності близькі за значенням.

3. Одержані результати дозволяють розрахунковими методами оцінювати характеристики матеріалів та розраховувати товщину нанесення при використанні їх для гасіння методом ізоляції.

3. Бурлин, Ю.К. Литология нефтегазоносных толщ [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. К. Бурлин, А. И. Конюхов, Е. Е. Карнюшина – М: Недра, 1991 – 286 с.
4. Кудинов В.А., Карташов Э.М. Техническая термодинамика. Учеб. Пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2000. – 261 с.
5. Корн Г, Справочник по математике для научных работников и инженеров, / Г. Корн, Т. Корн М., 1973 г., 832 с.

## MEASUREMENT OF GAS PERMEABILITY OF POROUS NON-COMBUSTIBLE MATERIALS AT TEMPERATURE UP TO 800°C USING A DYNAMIC MEASUREMENT METHOD

*O. Nikulin, Doct. of Sc. (Eng.), A. Kodryk, Cand. of Sc., O. Titenko, Cand. of Sc., O. Moroz  
The Ukrainian Civil Protection Research Institute, Ukraine*

---

### KEYWORDS

gas permeability, porous materials, dynamic measurement method, quenching by isolation method

### ANNOTATION

A special method for measuring the permeability of porous material in high temperature conditions is proposed, in which the nature of the change in measured values in time is dynamic is proposed. This approach allows us to measure the value of the coefficient of gas permeability of the porous material at temperatures up to 800 ° C. A method and laboratory setting for measuring the coefficient of gas permeability of a porous material using a method of dynamic measurement in high temperature conditions is described. The theoretical substantiation of this method is given. The formula for calculating the gas permeability coefficient by the described method is given.

## ИЗМЕРЕНИЕ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРИСТЫХ НЕГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ ДО 800° С МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ

*А.Ф. Никулин\*, д-р техн. наук, А.И. Кодрик, канд. техн. наук, А.М. Титенко, канд. техн. наук, А.И.Мороз*

*Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты, Украина*

---

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

газопроницаемость, пористые материалы, метод динамического измерения, тушения методом изоляции.

### АННОТАЦИЯ

Предложен специальный метод измерений газопроницаемости пористого материала в условиях высоких температур, при котором характер изменения измеряемых величин во времени является динамичным. Такой подход позволяет измерять величину коэффициента газопроницаемости пористого материала при температурах до 800 ° C. Описан способ и лабораторную установку для измерения коэффициента газопроницаемости пористого материала с помощью метода динамического измерения в условиях высоких температур. Приведено теоретическое обоснование этого метода. Приведенная формула для расчета коэффициента газопроницаемости описанным методом.