

ГЕВОРКЯН Е.С., докт. техн. наук, професор;
КОМАРОВА Г.Л., канд. техн. наук, доцент,
ВОЛОШИНА Л.В., канд. техн. наук, старший викладач;
ВОЛОШИН Д.І., канд. техн. наук, доцент;
ТИМОФЕЄВА Л.А. докт. техн. наук, професор;
Український державний університет залізничного транспорту

Метрологічне забезпечення контролю геометричних параметрів пористих матеріалів на основі аналізу фільтраційних характеристик



Анотація. У статті вирішено актуальну науково-практичну задачу розроблення **інформаційно-вимірювального методу непрямого неруйнівного контролю** інтегральних геометричних параметрів пористих матеріалів. Метод базується на аналізі гідрогазодинамічних характеристик фільтраційного перенесення тестового середовища крізь пористу структуру досліджуваного об'єкта. Сформовано концептуальну вимірювальну модель, що встановлює взаємозв'язок між безпосередньо вимірюваними фізичними величинами (об'ємною витратою газу та перепадом тиску на зразку) і шуканими геометричними параметрами (ефективним діаметром пор та їх просторовою концентрацією). Обґрунтовано введення метрологічних поправок у вигляді коефіцієнтів умовної проникності та ефективності проникнення для компенсації методичних похибок, зумовлених використанням ідеалізованої капілярної моделі. Проведено детальний метрологічний аналіз чутливості вимірювальних каналів і розраховано сумарну стандартну невизначеність непрямих вимірювань відповідно до вимог ISO JCGM. Складено бюджет невизначеності, а також виконано валідацію запропонованого методу за коефіцієнтом **En**.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система; неруйнівний контроль; пористий матеріал; геометричні параметри пор; газопроникність; непрямі вимірювання; невизначеність вимірювань; метрологічне забезпечення.

Постановка проблеми.

Розвиток сучасного приладобудування, машинобудування, транспортної галузі, зокрема залізничного транспорту, а також хімічної та екологічної промисловості супроводжується широким застосуванням високопористих матеріалів із контрольованими структурно-геометричними параметрами. Такі матеріали знаходять застосування як фільтрувальні елементи, каталізатори, перколяційні датчики, шумопоглинальні елементи та чутливі елементи вимірювальних перетворювачів вологості, тиску й концентрації газів [1, 2].

Властивості пористих матеріалів визначаються хімічним складом і структурою. Під структурою розуміють характер геометричного розподілу та взаємного розташування мікроструктурних елементів пористого тіла – зерен, міжзеренних меж, контактів між зернами та пор. Структура пористих виробів формується технологією їх виготовлення. За особливостями структури розрізняють три основні типи пористих матеріалів:

1. Комірчаста зі спеченим каркасом – утворена спеченими безпористими перемичками та сферичними порами. Характеризується високою механічною міцністю, проте має низьку проникність

і порівняно невисоку теплостійкість.

2. Комірчаста без спеченого каркаса – сферичні пори оточені пористими перемичками. Характеризується нижчою механічною міцністю, кращими теплоізоляційними властивостями та за своєю будовою є композитом із безперервною твердою і переривчастою газовою фазами.

3. Зерниста з каркасом – утворена частинками наповнювача, скріпленими керамічною або металевою зв'язкою. Характеризується переважно відкритими порами нерегулярної форми, високою проникністю та високою теплостійкістю і є композитом із безперервною газовою та переривчастою твердою фазами.

Контроль структурно-геометричних параметрів пористих матеріалів у процесі їх виготовлення та експлуатації є одним із ключових завдань. Традиційні методи контролю геометричних параметрів пористих структур поділяють на дві основні групи:

– руйнівні методи (металографічний аналіз, рентгенографічний аналіз зрізів, ртутна порозиметрія). Вони забезпечують високу точність визначення параметрів пористої структури, проте унеможливають подальше використання виробу, є трудомісткими та можуть становити екологічну небезпеку;

– неруйнівні методи (оптичні та акустичні). Їх застосування є обмеженим: оптичні методи дають інформацію лише про поверхневий шар виробу і не дозволяють оцінити внутрішню структуру порового простору, тоді як акустичні методи характеризуються недостатньою роздільною здатністю [3] під час контролю дрібнопористих структур. Сучасні неруйнівні підходи розширюються за рахунок електромагнітних та спектроскопічних методів, зокрема терагерцової спектроскопії, що дає змогу оцінювати пористість керамічних матеріалів без руйнування зразка [4].

У зв'язку з цим актуальним є розроблення та метрологічне обґрунтування непрямих інформаційно-вимірювальних методів неруйнівного контролю, заснованих на оцінюванні інтегрального гідродинамічного опору пористого тіла під час проходження потоку тестового газу. Це дає змогу оперативно, без руйнування виробу, одержувати інтегральну інформацію про внутрішню структуру об'єкта вимірювання за допомогою відносно простих у реалізації вимірювальних каналів тиску та витрати [5, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження, присвячені контролю структурно-геометричних параметрів пористих матеріалів, упродовж останніх років розвиваються у двох взаємопов'язаних напрямках. Перший пов'язаний з удосконаленням експериментальних методів дослідження пористої структури, другий – із розвитком інформаційно-вимірювальних технологій непрямого визначення її характеристик та математичних моделей вимірювального перетворення [5, 6].

Теоретичні основи процесів перенесення рідин і газів у пористих середовищах сформовано у фундаментальних працях з механіки фільтрації, гідродинаміки та фізики пористих тіл [7, 8]. Подальший розвиток цих положень знайшов відображення у роботах, присвячених моделюванню процесів перенесення в пористих середовищах та взаємозв'язку мікроструктури матеріалу з його фізико-механічними й експлуатаційними властивостями [9]. Закономірності капілярного руху рідин, що лежать в основі багатьох непрямих методів оцінювання пористості, описані у класичній роботі Е. В. Вошберна [10]. Аналітичний розвиток рівняння Lucas–Washburn, зокрема з урахуванням фізичних параметрів процесу капілярного проникнення, наведено у роботі [11]. Застосовність рівняння Lucas–Washburn для опису капілярного підйому в нанопорах отримала підтвердження в молекулярно-динамічних дослідженнях, що свідчить про фізичну обґрунтованість капілярної моделі навіть для маломасштабних порових структур [12].

Останніми роками значна кількість досліджень спрямована на вдосконалення методів

визначення геометричних характеристик пористих матеріалів. Найбільшого поширення набули рентгенівська комп'ютерна томографія, сканувальна електронна мікроскопія, ртутна порозиметрія, газоадсорбційні методи, низькопольовий ядерний магнітний резонанс, методи газового розширення та цифрового аналізу зображень [13, 14]. Аналіз сучасних підходів свідчить, що кожен із зазначених методів має власний діапазон визначення розмірів пор, переваги та обмеження, а найбільш достовірні результати досягаються шляхом комплексного використання декількох взаємодоповнювальних методів дослідження [15, 16]. Експериментальні дослідження пористої кераміки підтверджують безпосередній взаємозв'язок між розміром і морфологією пор та газопроникністю матеріалу [17]. Також, експериментальні дослідження газопроникності ізотропних пористих матеріалів показують, що коефіцієнт проникності може бути оцінений за результатами вимірювання газової витрати та перепаду тиску, а характеристики фільтраційного перенесення залежать від структури пористого середовища [18].

Поряд із розвитком експериментальних методів активно розвиваються числові методи дослідження процесів фільтрації із застосуванням обчислювальної гідродинаміки (CFD), цифрових моделей порового простору та концепції цифрового двійника. Такі підходи дозволяють прогнозувати проникність, оцінювати вплив геометрії пор на фільтраційні характеристики та оптимізувати структуру матеріалу ще на стадії проектування [1]. Водночас достовірність результатів моделювання безпосередньо залежить від точності експериментальних даних та рівня метрологічного забезпечення вимірювань.

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із розробленням інформаційно-вимірювальних систем неруйнівного контролю пористих матеріалів. У таких системах дедалі ширше застосовуються непрямі методи оцінювання структурних характеристик за результатами вимірювання фізичних параметрів процесів перенесення, акустичних, теплових або газодинамічних характеристик об'єкта контролю. Використання непрямих методів забезпечує можливість автоматизації контролю, скорочення часу вимірювання та реалізації безперервного моніторингу технологічних процесів без руйнування виробів [3].

Особливого значення набувають питання метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем. У сучасній метрології основна увага приділяється побудові математичних моделей вимірювального перетворення, аналізу чутливості вимірювальних каналів, оцінюванню сумарної невизначеності результатів непрямих вимірювань та забезпеченню їх метрологічної простежуваності відповідно до міжнародних рекомендацій ISO JCGM [19]. Проблеми

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

адекватного представлення геометрії та топології порового простору під час його непрямої характеристики, а також обмеження спрощених моделей пористої структури розглянуто у роботі [20]. Практичні аспекти оцінювання невизначеності під час визначення пористості металевих матеріалів досліджено у [21], де проаналізовано внески окремих складових невизначеності та визначено домінуючі джерела її формування. Застосування невизначеності під час оцінювання відповідності встановленим вимогам регламентовано рекомендаціями [22]. Загальні вимоги до забезпечення компетентності під час міжлабораторних випробувань визначені міжнародним стандартом [23].

Суттєвий внесок у розвиток технологій виготовлення високоміцних пористих керамічних матеріалів, дослідження закономірностей формування їх структури та фізико-механічних властивостей зроблено у працях [24–26]. У цих роботах досліджено особливості формування пористої структури, процеси електроконсолідації, фазові перетворення та перспективи практичного застосування пористих керамічних матеріалів. Водночас питання побудови інформаційно-вимірювальних систем для оперативного неруйнівного контролю інтегральних геометричних параметрів таких матеріалів залишаються недостатньо висвітленими.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Незважаючи на значну кількість досліджень у галузі контролю пористих матеріалів, недостатньо розробленими залишаються інформаційно-вимірювальні методи непрямого неруйнівного контролю, які забезпечують визначення інтегральних геометричних параметрів пористої структури за результатами вимірювання гідродинамічних характеристик фільтраційного перенесення. Практично відсутні математичні моделі вимірювального перетворення, що одночасно пов'язували б безпосередньо вимірювані величини (витрату та перепад тиску) із геометричними параметрами пористого середовища, враховували методичні похибки спрощених капілярних моделей та забезпечували повне метрологічне оцінювання результатів непрямих вимірювань відповідно до рекомендацій ISO JCGM [20, 22]. Саме на розв'язання цієї науково-практичної проблеми спрямоване дане дослідження.

Формулювання мети.

Розроблення та метрологічне обґрунтування інформаційно-вимірювального методу непрямого неруйнівного контролю геометричних параметрів пористих матеріалів на основі аналізу фільтраційних характеристик перенесення тестового газу, що забезпечує оцінювання невизначеності вимірювань відповідно до вимог міжнародного керівництва ISO JCGM.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

1. Розробити функціональну схему інформаційно-вимірювальної системи для практичної реалізації запропонованого методу непрямого неруйнівного контролю геометричних параметрів пористих матеріалів.

2. Розробити геометричну та математичну модель непрямого контролю геометричних параметрів пористих матеріалів на основі капілярного підходу та законів Гагена–Пуазейля, Вашборна і Стокса, адаптовану до використання стислих газових тестових середовищ.

3. Запропонувати фізико-геометричний підхід до оцінювання пропускної здатності пористого матеріалу, який встановлює взаємозв'язок між макроскопічною проникністю та мікроструктурними геометричними параметрами пористого середовища.

4. Обґрунтувати введення безрозмірних модельних коефіцієнтів – коефіцієнта умовної проникності та коефіцієнта проникаючої ефективності – для компенсації систематичних методичних похибок, зумовлених використанням спрощеної капілярної моделі.

5. Провести експериментальну апробацію запропонованого методу, виконати метрологічний аналіз чутливості вимірювальних каналів, оцінити бюджет невизначеності вимірювань відповідно до вимог ISO JCGM та здійснити валідацію методу за коефіцієнтом E_n .

Виклад основного матеріалу дослідження.

Фізична сутність запропонованого інформаційно-вимірювального методу непрямого неруйнівного контролю геометричних параметрів пористих матеріалів полягає у пропусканні тестового сухого очищеного стисненого повітря через пористе тіло визначеної геометричної форми. Для практичної реалізації методу розроблено функціональну схему інформаційно-вимірювальної системи, яка забезпечує формування, реєстрацію та оброблення вимірювальної інформації.

До складу інформаційно-вимірювальної системи входять такі основні компоненти:

1. Блок підготовки газового середовища: джерело стисненого газу (компресор), ресивер для згладжування пульсацій тиску, фільтр очищення повітря та вологовідділювач.

2. Первинні вимірювальні перетворювачі:

- перетворювач абсолютного тиску на вході до робочої комірки;
- перетворювач перепаду тиску (диференційний манометр) на зразку;
- тепловий масовий витратомір газу на виході з робочої комірки.

3. Обчислювальний блок: багатоканальний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), мікропроцесорний контролер або

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

персональний комп'ютер зі спеціалізованим програмним забезпеченням для оброблення вимірювальних сигналів та обчислення контрольованих параметрів за рівняннями непрямих вимірювань.

Важливою складовою метрологічного забезпечення є калібрування інформаційно-вимірювальної системи із застосуванням засобів вимірювальної техніки, що забезпечують

метрологічну простежуваність до міжнародних еталонів SI. Це дає змогу забезпечити єдність вимірювань та достовірність результатів визначення гідродинамічних характеристик пористого матеріалу.

Функціональну схему взаємодії компонентів інформаційно-вимірювальної системи наведено на рисунку 1.

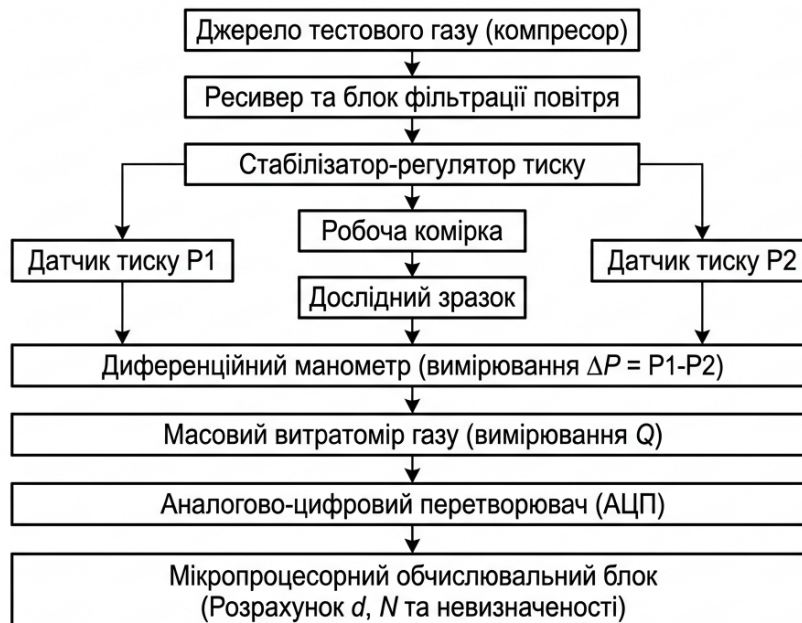


Рис. 1. Функціонально-структурна схема інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів пористості

Математична модель інформаційно-вимірювального перетворення.

Для побудови адекватної вимірювальної моделі використано концепцію еквівалентних каналів фільтрації. Реальне пористе тіло зі складною топологією міжчастинкових пор представляється у вигляді еквівалентної системи паралельних циліндричних капілярів однакового діаметра, що пронизують зразок по всій його довжині.

Базові гідродинамічні співвідношення та узагальнення для газів.

Всі пори, що можуть бути в проникних твердих тілах, поділяють на закриті, каналотворюючі (відкриті з обох кінців) та тупикові. Ізольовані закриті пори округлої форми не беруть участі у процесах фільтрації. Тупикові пори заповнюються флюїдом, збільшуючи значення відкритої пористості при статичних вимірюваннях, але не впливають на динамічну проникність. Пори, відкриті з обох кінців, зазвичай мають розширення (порожнини) та звуження (горловини), набуваючи складної пляшкоподібної форми [25, 28]. Порові канали в реальному матеріалі пронизують виріб у всіх напрямках, переплітаючись між собою, що змушує флюїд перетікати з одного капіляра в інший, шукаючи найкоротший шлях.

Для визначення проникності скористаємося класичним визначенням Е. Вашборна [10], відповідно до якого проникність P_{perm} (м/с) визначається як швидкість, з якою тіло дозволяє флюїду протікати від однієї сторони до іншої

$$P_{perm} = \frac{Q_t}{S} \quad (1)$$

де Q_t – об'єм газу або рідини, що проходить крізь поперечний переріз пористого тіла в одиницю часу ($\text{м}^3/\text{с}$);

S – площа поперечного перерізу пористого тіла (м^2).

Опис течії в тонких капілярах базується на законі Гагена-Пуазейля [2]. Для одного циліндричного капіляра довжиною l та діаметром d об'ємна витрата рідини q_i дорівнює

$$Q_i = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta P}{128 \cdot \mu \cdot l} = K_{prop} \cdot d^4 \cdot \frac{\Delta P}{l} \quad (2)$$

де $\Delta P = P_1 - P_2$ – перепад тиску на капілярі (Па);

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

μ – динамічна в'язкість тестового середовища (Па·с);

K_{prop} – коефіцієнт пропорційності, що за виводом Стокса [2] дорівнює

$$K_{prop} = \frac{\pi}{128 \cdot \mu} \quad (3)$$

Використання рівняння закону Пуазейля безпосередньо для розрахунку протікання газів обмежене через те, що гази є стисливими флюїдами й змінюють свій об'єм залежно від тиску. Для врахування стисливості використаємо рівняння стану ідеального газу Клапейрона [8]

$$P \cdot V = \text{const} \quad (\text{при } T = \text{const}). \quad (4)$$

Тоді у загальному випадку для газів при постійній температурі рівняння Пуазейля набуває уточненого вигляду з урахуванням зміни об'єму вздовж каналу

$$Q_g = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \bar{P} \cdot \Delta P}{128 \cdot \mu \cdot l \cdot P_{out}}, \quad (5)$$

де $\bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2}$,

P_{out} – тиск на виході (зазвичай атмосферний), при якому контролюється вихідний об'єм газу.

За умови малих перепадів тисків, коли виконується нерівність

$$\frac{P_1 + P_2}{2 \cdot P_{out}} \approx 1, \quad (6)$$

стандартне рівняння закону Пуазейля стає практично точним і для газів. За цієї умови, припускаючи, що всі пори є наскрізними з однаковим круговим перерізом діаметром d , загальна витрата через зразок із кількістю пор n запишеться як

$$Q_t = n \cdot q_i = n \cdot \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta P}{128 \cdot \mu \cdot l}. \quad (7)$$

Введемо поверхневу щільність пор на одиницю площі поверхні тіла $N = n / S$ (1/м²)

$$P_{perm} = \frac{Q_t}{S} \cdot N \cdot \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta P}{128 \cdot \mu \cdot l}. \quad (8)$$

Для опису фільтраційних процесів у пористому матеріалі на макроскопічному рівні доцільно перейти від локального опису порової структури до континуальної моделі пористого середовища, враховуючи, що окремі геометричні та

топологічні характеристики порового простору мають різний вплив на рух флюїду [8, 29, 30]. Представимо проникність у вигляді інтегрального рівняння фільтрації Дарсі [8, 31]

$$P_{perm} = K_f \cdot \frac{\Delta P}{l}, \quad (9)$$

де K_f – коефіцієнт проникності пористого тіла тестовим середовищем визначеної в'язкості (м²/Па·с). Порівнюючи вирази, отримуємо

$$K_f = N \cdot$$

$$\frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \mu} = \frac{K_{abs}}{\mu}, \quad (10)$$

де K_{abs} – абсолютний коефіцієнт проникності (м²), який залежить виключно від геометричних характеристик пористого каркаса.

Абсолютний коефіцієнт проникності є сталою характеристикою конкретного пористого тіла. З цього випливає висновок, що значення коефіцієнта проникності, визначені для одного й того самого зразка із застосуванням різних тестових середовищ, мають обернену залежність від динамічної в'язкості цих середовищ

$$\frac{K_{f1}}{K_{f2}} = \frac{\mu_2}{\mu_1}. \quad (11)$$

У загальному випадку відношення площі всіх пор S_{pores} до повної площі одиниці поверхні зразка S визначає відкриту поверхневу пористість P_{open}

$$P_{open} = N \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (12)$$

підставляючи це співвідношення у формулу для абсолютного коефіцієнта проникності, отримаємо

$$K_{abs} = P_{open} \cdot \frac{d^2}{32}, \quad (13)$$

та для коефіцієнта проникності середовищем

$$K_f = P_{open} \cdot \frac{d^2}{32}. \quad (14)$$

Функція поверхневої пористості P_{open} визначена в інтервалі (0; 1), де нижня межа відповідає суцільному безпористому матеріалу ($P_{open} \rightarrow 0$), а верхня – граничному випадку повної

пористості, коли матеріальний каркас практично відсутній ($P_{open} \rightarrow 0$), Оскільки реальні пористі матеріали повинні зберігати механічну цілісність, у межах запропонованої моделі пористе тіло розглядається як щільноупакована матриця пор-трубок круглого перерізу з міжпоровими стінками, товщина яких у граничному випадку прямує до нуля. Схематичне представлення такої моделі наведено на рисунку 2.

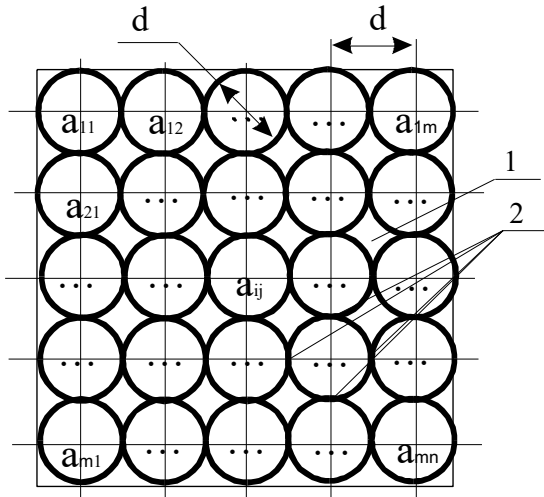


Рис. 2. Схема умовної матриці щільноупакованих $m \times n$ пор-трубок:

1 – твердотільний каркас; 2 – містки каркаса, нескінченно тонкі у місцях граничного наближення сусідніх пор умовної матриці; d_{ij} – елементарний капіляр

Для такої щільноупакованої квадратної матриці капілярів граничне геометричне значення пористості обмежене відношенням площі вписаного кола до площі квадрата й дорівнює

$$P_{open}^{max} = \frac{\pi}{4} \approx 0,7854.$$

Для гексагональної (найщільнішої) упаковки капілярів ця границя становить

$$P_{open}^{max} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx 0,9069.$$

З урахуванням цих обмежень, область існування коефіцієнтів проникності для реальних твердих тіл запишеться у вигляді нерівностей

$$0 < K_{abs} < \frac{\pi d^2}{128} \quad (\text{для квадратної ґратки})$$

$$0 < K_f < \frac{\pi d^2}{128 \mu}$$

У разі виходу за ці межі матеріал втрачає структурну стійкість і перетворюється на незв'язаний порошок.

Значення абсолютного коефіцієнта проникності K_{abs} характеризує здатність пористого середовища пропускати флюїд і має розмірність m^2 (або Дарсі, 1 Дарсі $\approx 1,02 \cdot 10^{-12} m^2$) [7]. Сам по собі цей показник не дозволяє в явному вигляді оцінити ступінь використання потенціалу проникності матеріалу. Для вирішення цієї задачі запропоновано використовувати два безрозмірні критерії:

1. Коефіцієнт умовної проникності η_s – безрозмірний коефіцієнт, що визначається як відношення фактичної абсолютної проникності K_{abs} до її теоретично максимально можливого значення для ідеалізованої квадратної схеми розташування пор однакового діаметра

$$\eta_s = \frac{K_{ads}}{K_{abs}^{max}} = \frac{N \pi d^4 / 128}{\pi d^2 / 128} = N \cdot d^2 \quad (15)$$

2. Коефіцієнт дійсної поверхневої проникності η_p – відношення K_{abs} до абсолютного межового значення вільного простору ($P_{open} \rightarrow 1$)

$$\eta_p = \frac{K_{abs}}{K_{abs}^{limit}} = \frac{P_{open} \cdot d^2 / 128}{d^2 / 128} = P_{open} \quad (16)$$

Обидва коефіцієнти мають чіткий фізичний зміст: η_p показує частку загальної геометричної площі зразка, яка безпосередньо зайнята порами, а η_s характеризує щільність розташування пор обраної геометрії на поверхні тіла відповідно до капілярної моделі. Для швидкого оперативного контролю цих характеристик розроблено сітчасту номограму залежності коефіцієнта умовної проникності від геометричних параметрів (діаметра пор та їх щільності), представлену на рисунку 3.

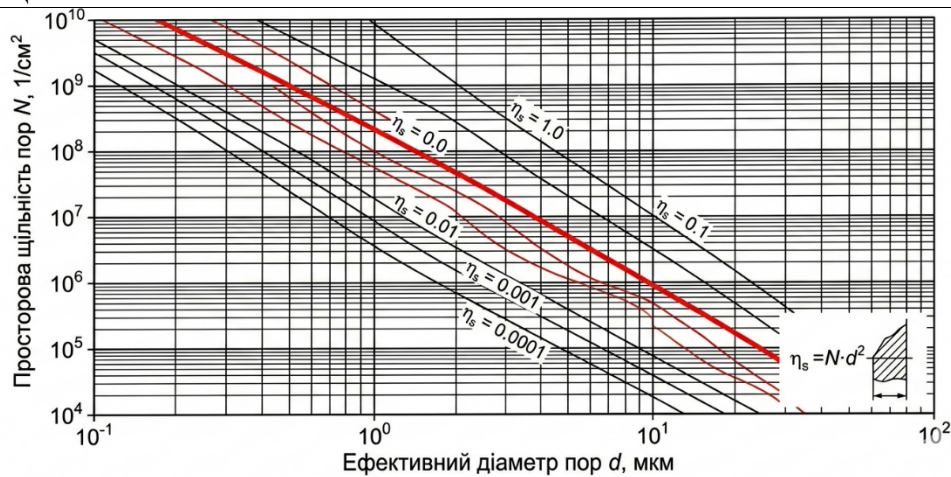


Рис. 3. Сітчаста номограма ізоліній умовної проникності η_s в інтервалах діаметрів пор та їх просторової щільності

У термінології порошкової металургії значення поверхневої пористості тісно пов'язане з об'ємною пористістю через рівняння зв'язку з густиною матеріалу [6]

$$\theta = \left(1 - \frac{\rho_{por}}{\rho_{solid}}\right) \cdot 100\% , \quad (17)$$

де ρ_{por} – густина пористого тіла (г/см³);
 ρ_{solid} – теоретична густина безпорожнистої речовини (г/см³).

Для статистично однорідного та ізотропного пористого середовища за стереологічним співвідношенням середня площинна пористість P_{open} може бути прирівняна до об'ємної пористості θ .

Виконаємо математичне перетворення базового рівняння проникності. Застосуємо заміну в'язкості на коефіцієнт текучості тестового флюїду Φ (м²/Н·с): $\Phi = 1/\mu$ та введемо довжину периметра змочування пори кругового перерізу $U = \pi d$ (м). Підставивши ці залежності у трансформоване рівняння Пуазейля з урахуванням виразу для коефіцієнта умовної проникності η_s , після алгебраїчних скорочень отримаємо нову узагальнену формулу пропускної здатності пористого матеріалу

$$P_{perm} = \frac{\eta_s \cdot \Phi \cdot \Delta P \cdot d \cdot U}{128 \cdot l} . \quad (18)$$

Нове фізико-геометричне трактування.

Проникність пористого тіла прямо пропорційна довжині периметра змочування капілярів U , текучості тестового флюїду Φ перепаду тиску ΔP , відношенню лінійного діаметра пори до її довжини d/l , а також безрозмірному коефіцієнту умовної проникності η_s , який інтегрально враховує

просторову щільність капілярних каналів. Це підкреслює визначальну роль геометричного фактору стінок каналів (периметра змочування) у формуванні гідродинамічного опору.

Реальні пористі матеріали містять велику кількість тупикових та закритих пор. Для оцінювання адекватності вимірювальної моделі пропонується використовувати безрозмірний коефіцієнт проникаючої ефективності пороутворення η_{eff} . Спочатку за допомогою ІВС експериментально визначається фактична проникність зразка P_{exp}^{perm} шляхом прямих

вимірювань витрати Q^{exp} та площі S

$$P_{open}^{max} = \frac{Q^{exp}}{S} . \quad (19)$$

На основі отриманої швидкості вираховується ефективна кількість активних пор N_{eff} на одиницю площі зразка

$$N_{eff} = \frac{128 \cdot P_{open}^{max} \cdot \mu \cdot l}{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta P} . \quad (20)$$

Коефіцієнт проникаючої ефективності пороутворення η_{eff} розраховується як відношення знайденого числа активних каналів до загальної кількості відкритих пор N , визначеної незалежним методом (оптичним або металографічним)

$$\eta_{eff} = \frac{N_{eff}}{N} . \quad (21)$$

Якщо $\eta_{eff} \rightarrow 1$, то структура матеріалу є повністю каналуєтворюючою та ідеально відповідає вимірювальній моделі. Якщо $\eta_{eff} \rightarrow 0$, матеріал

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

містить переважно тупикові пори й неефективний як фільтр.

Оскільки визначення геометричних параметрів d та N_{eff} є непрямим вимірюванням, точність отриманого результату залежить від інструментальних похибок датчиків тиску, витратоміра, геометричних вимірювань зразка, а також відхилення параметрів моделі. Визначимо вихідну величину для діаметра пор як $Y = d$, а вхідні вимірювані параметри як вектор $X = \{Q, \mu, l, \eta_{eff}, N, S, \Delta P\}$. Для розрахунку коефіцієнтів чутливості виконаємо логарифмування робочого рівняння для діаметра пор

$$\ln d = \frac{1}{4} [\ln(128) + \ln Q + \ln \mu + \ln l - \ln \pi - \ln \eta_{eff} - \ln N - \ln S - \ln(\Delta P)]$$

. (22)

Диференціюючи отриманий вираз за кожної змінною, отримаємо коефіцієнти чутливості $c_i = \frac{\partial d}{\partial x_i}$:

$$c_Q = \frac{\partial d}{\partial Q} = \frac{d}{4Q}, \quad \text{за об'ємною витратою газу } Q$$

$$c_{\Delta P} = \frac{\partial d}{\partial \Delta P} = -\frac{d}{4\Delta P}, \quad \text{за перепадом тиску } \Delta P$$

$$c_l = \frac{\partial d}{\partial l} = \frac{d}{4l}, \quad \text{за товщиною зразка } l$$

$$c_S = \frac{\partial d}{\partial S} = -\frac{d}{4S}, \quad \text{за площею зразка } S$$

$$c_\mu = \frac{\partial d}{\partial \mu} = \frac{d}{4\mu}, \quad \text{за динамічною в'язкістю газу } \mu$$

Таблиця 1

Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки

Вимірювальний канал	Засіб вимірювальної техніки	Діапазон вимірювань	Клас точності / Границя похибки	Тип розподілу похибки
Канал витрати газу (Q)	Тепловий масовий витратомір	0 ... 50 л/хв	$\pm 1,5\%$ від вимірюваного значення	Прямокутний
Канал тиску на вході (P_l)	Датчик абсолютного тиску	0 ... 250 кПа	$\pm 0,25\%$ від діапазону	Прямокутний
Канал перепаду тиску (ΔP)	Диференціальний манометр	0 ... 100 кПа	$\pm 0,25\%$ від діапазону	Прямокутний

Сумарна стандартна невизначеність непрямого вимірювання ефективного діаметра пор $u_c(d)$ за умови взаємної незалежності вхідних величин обчислюється відповідно до керівництва ISO JCGM [19] за формулою

$$\left(\frac{u_c(d)}{d}\right)^2 = \frac{1}{16} \left[\left(\frac{u(Q)}{Q}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta P)}{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{u(l)}{l}\right)^2 + \left(\frac{u(S)}{S}\right)^2 + \left(\frac{u(\mu)}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{u(N)}{N}\right)^2 + \left(\frac{u(\eta_{eff})}{\eta_{eff}}\right)^2 \right]$$

(23)

Степеневий характер вимірювального рівняння, в якому показники степеня при основних вхідних величинах за модулем дорівнюють 1/4, зумовлює послаблення впливу кожної окремої відносної невизначеності на результат непрямого вимірювання. Водночас сумарна невизначеність визначається спільним впливом усіх вхідних величин та їх комбінуванням відповідно до ISO JCGM. Наприклад, для окремої вхідної величини з відносною стандартною невизначеністю 2,0 % відповідно до показника степеня 1/4 складова відносної невизначеності результату становитиме 0,5 %. Однак це значення не є сумарною невизначеністю результату, оскільки всі складові бюджету комбінуються відповідно до вимірювальної моделі.

Для валідації розробленого інформаційно-вимірювального методу було проведено серію досліджень. Як дослідні зразки використовувалися проникні керамічні диски, отримані методом порошкової металургії на основі наповнювача з електрокорунду зі спеченим склокристалічним каркасом. Геометричні розміри зразків: діаметр $D_s = (30,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$ м, товщина $l = (5,0 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$ м. Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), задіяних в ІВС, наведено в таблиці 1.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Геометричні розміри (l, D_s)	Цифровий мікрометр	0 ... 50 мм	$\pm 0,002$ мм	Прямокутний
----------------------------------	--------------------	-------------	----------------	-------------

Тестовим середовищем виступав очищений стиснений азот при температурі вимірювання $T = (293,15 \pm 0,5)$ К. Динамічна в'язкість азоту при цій температурі за табличними даними становить $\mu = 1,76 \cdot 10^{-5}$ Па с із стандартною невизначеністю за типом

Таблиця 2

Результати експериментальних вимірювань та розрахунку геометричних параметрів пор

№ зр аз ка	Різниця тисків ΔP , Па	Об'ємна витрата газу $Q \cdot 10^{-4}$, м ³ /с	Виміряна відкрита пористість P_{open} , відн. од.	Розрахунковий діаметр пор d , мкм	Поверхнева щільність пор $N \cdot 10^7$, 1/м ²	Коефіцієнт умовної проникності η_s
1	12450 $\pm$ 120	1,25 $\pm$ 0,02	0,38 $\pm$ 0,01	23,1 $\pm$ 0,1	90,7 $\pm$ 1,5	0,048 $\pm$ 0,001
2	15600 $\pm$ 150	1,82 $\pm$ 0,03	0,42 $\pm$ 0,01	24,7 $\pm$ 0,1	87,5 $\pm$ 1,4	0,053 $\pm$ 0,001
3	18900 $\pm$ 180	3,15 $\pm$ 0,05	0,46 $\pm$ 0,01	27,3 $\pm$ 0,1	78,5 $\pm$ 1,2	0,058 $\pm$ 0,001
4	22100 $\pm$ 200	4,85 $\pm$ 0,08	0,49 $\pm$ 0,01	30,2 $\pm$ 0,1	68,4 $\pm$ 1,0	0,062 $\pm$ 0,001
Сумарне					100	

Аналіз результатів та метрологічна оцінка.

Для метрологічного оцінювання запропонованого методу виконано аналіз бюджету невизначеності відповідно до вимог ISO JCGM.

Стандартну невизначеність типу А визначено за результатами серії з $n=5$ паралельних вимірювань, що характеризує повторюваність результатів. Стандартні невизначеності типу В оцінено для основних вхідних величин вимірювальної моделі.

Узагальнений розподіл внесків окремих складових у сумарну дисперсію результату вимірювання ефективного діаметра пор для зразка №3 наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Узагальнений бюджет невизначеності вимірювання ефективного діаметра пор для зразка №3

Джерело невизначеності	Відносний внесок за дисперсією у сумарну невизначеність, %
Похибка вимірювання витрати $u(Q)$	18,5
Похибка вимірювання перепаду тиску $u(\Delta P)$	14,1
Похибка вимірювання товщини зразка $u(l)$	0,01
Невизначеність площі зразка $u(S)$	2,6
Невизначеність динамічної в'язкості $u(\mu)$	8,0
Невизначеність модельного коефіцієнта ефективності $u(\eta_{eff})$	56,7

В $u(\mu) = 0,01 \cdot 10^{-5}$ Па с. У таблиці 2 наведено результати вимірювань фільтраційних параметрів та розраховані значення геометричних характеристик для чотирьох дослідних зразків фільтрів з різною дисперсністю вихідного порошку.

Як видно з таблиці 3, найбільший внесок у сумарну невизначеність формує невизначеність модельного коефіцієнта ефективності $u(\eta_{eff})$, частка якої становить 56,7 %. Внески витрати (Q) та перепаду тиску (ΔP) становлять відповідно 18,5 % та 14,1 %, тоді як вплив геометричного параметра (l) є незначним – 0,01 %.

Розберемо числовий приклад розрахунку бюджету невизначеності для зразка №3. Вхідні дані:

$$Q = 3,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\Delta P = 18900 \text{ Па};$$

$$l = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$S = \frac{\pi D_s^2}{4} = 7,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$\mu = 1,76 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$P_{open} = 0,46.$$

Визначимо стандартні невизначеності за типом В:
стандартна невизначеність вимірювання витрати газу

$$u(Q) = \frac{3,15 \cdot 10^{-4} \cdot 0,015}{\sqrt{3}} = 2,73 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\left(\frac{u(Q)}{Q} = 0,87\% \right);$$

стандартна невизначеність вимірювання перепаду тиску

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

$$u(\Delta P) = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 0,0025}{\sqrt{3}} = 144,3$$

стандартна невизначеність в'язкості

$$\left(\frac{u(\Delta P)}{\Delta P} = 0,76\% \right);$$

$$u(\mu) = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{с} \left(\frac{u(\mu)}{\mu} = 0,57\% \right);$$

стандартна невизначеність товщини зразка

$$u(l) = \frac{0,002 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}} \approx 1,15 \cdot 10^{-6} \text{ м} \left(\frac{u(l)}{l} = 0,023\% \right);$$

стандартна невизначеність модельного коефіцієнта ефективності $u(\eta_{eff})$ за оцінкою адекватності становить 1,5%.Складемо бюджет невизначеності для визначення ефективного діаметра пор d (табл. 4).

відносна невизначеність площі зразка

$$\frac{u(S)}{S} = 2 \cdot \frac{u(D_s)}{D_s} = 2 \cdot \frac{0,05 \cdot 10^{-3}}{30,0 \cdot 10^{-3}} = 0,33\%;$$

Таблиця 4

Бюджет невизначеності вимірювання діаметра пор (для зразка №3)

Символ величини x_i	Значення величини	Стандартна невизначеність $u(x_i)$	Відносна невизначеність $u(x_i)/x_i$, %	Коефіцієнт чутливості $c_i = \frac{\partial d}{\partial x_i}$	Внесок сумарну невизначеність $u_i(d) = c_i \cdot u(x_i)$, мкм	Відносний внесок за дисперсією, %
Q	$3,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$	$2,73 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$	0,87	$2,17 \cdot 10^{-2} \text{ м}/\text{м}^3/\text{с}$	0,059	18,5
ΔP	18900 Па	144,3 Па	0,76	$-3,61 \cdot 10^{-10} \text{ м}/\text{Па}$	-0,052	14,1
l	$5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$1,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}$	0,023	$1,37 \cdot 10^{-3}$	0,002	0,01
S	$7,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	$2,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$	0,33	$-9,65 \cdot 10^{-3} \text{ м}/\text{м}^2$	-0,022	2,6
μ	$1,76 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$	$1,0 \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{с}$	0,57	$3,88 \cdot 10^{-1} \text{ м}/\text{Па} \cdot \text{с}$	0,039	8,0
η_{eff}	0,85	0,0128	1,50	$-8,03 \cdot 10^{-6} \text{ м}$	-0,103	56,7
Сумарне	$d = 27,3 \text{ мкм}$	—	—	—	0,137	100,0

На основі складеного бюджету невизначеності визначено сумарну стандартну невизначеність вимірювання ефективного діаметра пор

$$u_c(d) = 0,137 \text{ мкм}.$$

Для коефіцієнта охоплення $k=2$ розширена невизначеність становить

$$U_{0,95}(d) = k \cdot u_c(d) = 2 \cdot 0,137 \text{ мкм} \approx 0,27 \text{ мкм}.$$

Відносна розширена невизначеність вимірювання дорівнює

$$U_{rel} = \frac{U_{0,95}(d)}{d} \cdot 100\% = \frac{0,27}{27,3} \cdot 100\% \approx 1,0\%.$$

Отримане значення розширеної невизначеності характеризує досягнуту точність запропонованого методу для визначення ефективного діаметра пор у досліджуваних умовах.

Валідація результатів.

Валідацію розробленого методу проведено шляхом порівняння з незалежним оптичним методом.

Для підтвердження достовірності запропонованого інформаційно-вимірювального методу проведено порівняльне дослідження з використанням незалежного референтного методу (оптичної мікроскопії). Узгодженість результатів оцінювали за допомогою нормалізованої похибки E_n , яку розраховували відповідно до міжнародних метрологічних рекомендацій [32–33]

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

$$En = \frac{|d_{meas} - d_{ref}|}{\sqrt{U^2(d_{meas}) + U^2(d_{ref})}}, \quad (24)$$

де d_{meas} – значення діаметра пор, отримане розробленим методом, $d_{meas}=27,3$ мкм;

d_{ref} – значення, отримане еталонним (мікроскопічним) методом, $d_{ref}=27,5$ мкм;

$U(d_{meas})$ – розширена невизначеність методу 1,13%, що складає $U(d_{meas}) = 27,3 \cdot 0,0113 \approx 0,308$ мкм;

$U(d_{ref})$ – розширена невизначеність еталонного методу. Для оптичної мікроскопії приймемо стандартну розширену невизначеність $U \approx 0,400$ мкм;

$$En = \frac{|27,3 - 27,5|}{\sqrt{0,308^2 + 0,400^2}} = \frac{0,2}{0,505} \approx 0,40 \leq 1,0.$$

Отримане значення $En \leq 1$ підтверджує узгодженість результатів, отриманих запропонованим методом не прямого контролю, із референтними результатами, одержаними методом оптичної мікроскопії, у межах установлених невизначеностей, що підтверджує його метрологічну придатність.

Висновки.

1. Розроблено функціональну схему інформаційно-виміральної системи для реалізації методу непрямого неруйнівного контролю геометричних параметрів пористих матеріалів. Запропонована структура забезпечує формування, реєстрацію та оброблення виміральної інформації на основі вимірювання витрати тестового газу та перепаду тиску.

2. Розроблено геометричну та математичну модель непрямого контролю геометричних параметрів пористих матеріалів, що базується на капілярному підході та законах Гагена–Пуазейля, Вашборна і Стокса, адаптованих до використання стисливих газових середовищ. Сформовано виміральною модель, яка встановлює взаємозв'язок між безпосередньо вимірюваними фізичними величинами (об'ємною витратою газу Q та перепадом тиску ΔP) і геометричними параметрами пористої структури.

3. Запропоновано фізико-геометричний підхід до оцінювання пропускної здатності пористого матеріалу, який, на відміну від класичного закону Дарсі, встановлює безпосередній взаємозв'язок між проникністю та геометричними характеристиками пористої структури.

4. Обґрунтовано введення безрозмірних модельних коефіцієнтів у вигляді коефіцієнта умовної проникності η_s та коефіцієнта проникаючої ефективності η_{eff} , використання яких забезпечує компенсацію систематичних методичних похибок, зумовлених застосуванням спрощеної капілярної моделі.

5. Проведено експериментальну апробацію та метрологічне оцінювання запропонованого методу. За результатами оцінювання

бюджету невизначеності відповідно до вимог ISO JCGM встановлено, що розширена невизначеність визначення середнього ефективного діаметра пор не перевищує 1,0 % при використанні серійних засобів виміральної техніки середнього класу точності. Валідація методу за коефіцієнтом En підтвердила його метрологічну придатність до практичного застосування.

Список використаних джерел

- Ohji T., Fukushima M. Macro-Porous Ceramics: Processing and Properties. *International Materials Reviews*. 2012. Vol. 57, No. 2. P. 115–131. URL: <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000006>.
- Dullien F. A. L. Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure. 2nd ed. San Diego : Academic Press, 2012. 574 p. ISBN: 9780323139335
- Ultrasonic Method for Evaluation of Porosity of Materials / R. Kazys et al. *Ultragaras (Ultrasound)*. 2011. Vol. 66, No. 4. P. 7–17. URL: <https://doi.org/10.5755/j01.u.66.4.1021>.
- Non-destructive evaluation of ceramic porosity using terahertz time-domain spectroscopy / D. Hakobyan et al. *Journal of the European Ceramic Society*. 2022. Vol. 42, No. 2. P. 525–533. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.026>.
- Fan Z., Hu X., Gao R. X. Indirect Measurement Methods for Quality and Process Control in Nanomanufacturing. *Nanomanufacturing and Metrology*. 2022. Vol. 5. P. 209–229. URL: <https://doi.org/10.1007/s41871-022-00148-4>.
- Rossi G. B. A Model for Indirect Measurement. *Measurement*. 2023. Vol. 214. Art. 112798. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112798>.
- Darcy H. The Public Fountains of the City of Dijon / trans. by P. Bobeck. Dubuque, Iowa : Kendal/Hunt Publishing Company, 2004. 506 p. URL: [https://doi.org/10.1061/40683\(2003\)5](https://doi.org/10.1061/40683(2003)5).
- Bear J. Modeling Phenomena of Flow and Transport in Porous Media. Cham : Springer International Publishing, 2018. 742 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72826-1>.
- Whitaker S. The Method of Volume Averaging. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1999. 448 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3389-2>.
- Washburn E. W. The Dynamics of Capillary Flow. *Physical Review*. 1921. Vol. 17, No. 3. P. 273–283. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.17.273>.
- Hamraoui A., Nylander T. Analytical Approach for the Lucas–Washburn Equation. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2002. Vol. 250, No. 2. P. 415–421. URL: <https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8288>.
- Dimitrov D. I., Milchev A., Binder K. Capillary Rise in Nanopores: Molecular Dynamics Evidence for the Lucas–Washburn Equation. *Physical Review Letters*. 2007. Vol. 99, No. 5. Art. 054501. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.054501>.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

13. Physisorption of Gases, with Special Reference to the Evaluation of Surface Area and Pore Size Distribution (IUPAC Technical Report) / M. Thommes et al. *Pure and Applied Chemistry*. 2015. Vol. 87, No. 9–10. P. 1051–1069. URL: <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.
14. Reconstructed Hierarchical Pore Structure of Porous SiC Ceramics Using Micro-X-Ray Computed Tomography / Y. Zhang et al. *Advanced Engineering Materials*. 2023. Vol. 25, No. 14. Art. 2300039. URL: <https://doi.org/10.1002/adem.202300039>.
15. Schlumberger C., Thommes M. Characterization of Hierarchically Ordered Porous Materials by Physisorption and Mercury Porosimetry—A Tutorial Review. *Advanced Materials Interfaces*. 2021. Vol. 8. Art. 2002181. URL: <https://doi.org/10.1002/admi.202002181>.
16. Liquid Intrusion and Alternative Methods for the Characterization of Macroporous Materials (IUPAC Technical Report) / J. Rouquerol et al. *Pure and Applied Chemistry*. 2011. Vol. 84, No. 1. P. 107–136. URL: <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-10-11-19>.
17. Honda S., Jia P., Daiko Y. Gas permeation and thermomechanical properties for macroporous alumina focused on necking size at grain boundaries. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2022. Vol. 19, No. 2. P. 828–837. URL: <https://doi.org/10.1111/ijac.13860>.
18. Wałowski G. Experimental Studies of Gas Permeability Through Isotropic Porous Materials in the Cubic System. *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16, No. 13. Art. 6771. URL: <https://doi.org/10.3390/app16136771>.
19. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement : JCGM 100:2008 / Joint Committee for Guides in Metrology. Sèvres : BIPM, 2008. 120 p.
20. Rigby S. P. Do Pores Exist?—Foundational Issues in Pore Structural Characterisation. *Foundations*. 2024. Vol. 4, No. 2. P. 225–248. URL: <https://doi.org/10.3390/foundations4020015>.
21. Lifton J. J., Tan Z. J., Goh B., Mutiargo B. On the Uncertainty of Porosity Measurements of Additively Manufactured Metal Parts. *Measurement*. 2022. Vol. 188. Art. 110616. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110616>.
22. JCGM 106:2012. Evaluation of Measurement Data – The Role of Measurement Uncertainty in Conformity Assessment. Paris : BIPM, 2012. 31 p.
23. ISO/IEC 17043:2023. Conformity Assessment – General Requirements for the Competence of Proficiency Testing Providers. Geneva : ISO, 2023. 38 p.
24. Examination of Patterns in Obtaining Porous Structures from Submicron Aluminum Oxide Powder and Its Mixtures / E. S. Hevorkian et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6, No. 6(108). P. 41–49. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216733>.
25. Investigation of Phase and Structural States in Nanocrystalline Powders Based on Zirconium Dioxide / V. P. Nerubatskyi et al. *Low Temperature Physics*. 2023. Vol. 49, No. 12. P. 1277–1285. URL: <https://doi.org/10.1063/10.0021374>.
26. Technological and Innovative Features of the Electroconsolidation Method as a Kind of Plasma Sintering for Refractory Compounds / E. S. Hevorkian et al. *Journal of Superhard Materials*. 2024. Vol. 46, No. 5. P. 335–346. URL: <https://doi.org/10.3103/S1063457624050046>.
27. Honda S., Hashimoto S., Nait-Ali B. Characterization of anisotropic gas permeability and thermomechanical properties of highly textured porous alumina. *Journal of the American Ceramic Society*. 2022. Vol. 105, No. 10. P. 6335–6344. URL: <https://doi.org/10.1111/jace.18573>.
28. Blunt M. J. Multiphase Flow in Permeable Media: A Pore-Scale Perspective. Cambridge : Cambridge University Press, 2017. 508 p. URL: <https://doi.org/10.1017/9781316145098>.
29. Ehlers W., Wagner A. Modelling and simulation methods applied to coupled problems in porous-media mechanics. *Arch Appl Mech*. 2019. Vol. 89. P. 609–628. URL: <https://doi.org/10.1007/s00419-019-01520-5>.
30. Geohagan A., Truszkowska A. Finding the Dominant Properties of Porous Media: An Example of Fluid Flow. *Multiscale Sci. Eng.* 2024. Vol. 6. P. 249–261. URL: <https://doi.org/10.1007/s42493-024-00124-8>.
31. de Mattos F. N., Molisani A. L., Caldeira L. Gas permeability and compressive strength evaluation of porous Al₂O₃ supported membrane. *Cerâmica*. 2022. Vol. 68, No. 385. P. 46–51. URL: <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683853204>.
32. EA-4/02 M:2022. Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. Paris : European Co-operation for Accreditation, 2022. 78 p.
33. ISO 13528:2022. Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison. Geneva : ISO, 2022. 93 p.

References

1. Ohji, T., & Fukushima, M. (2012). Macroporous ceramics: Processing and properties. *International Materials Reviews*, 57(2), 115–131. <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000006>.
2. Dullien, F. A. L. (2012). *Porous media: Fluid transport and pore structure* (2nd ed.). Academic Press.
3. Kazys, R., Voleišis, A., Sliteris, R., Mažeika, L., Raišutis, R., & Jankauskas, A. (2011). Ultrasonic method for evaluation of porosity of materials. *Ultragaršas (Ultrasound)*, 66(4), 7–17. <https://doi.org/10.5755/j01.u.66.4.1021>.
4. Hakobyan, D., Hamdi, M., Redon, O., Lopez, T., Moustafa, S., & Bousquet, J. (2022). Non-destructive evaluation of ceramic porosity using terahertz time-domain spectroscopy. *Journal of the European Ceramic*

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- Society*, 42(2), 525–533. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.026>.
5. Fan, Z., Hu, X., & Gao, R. X. (2022). Indirect measurement methods for quality and process control in nanomanufacturing. *Nanomanufacturing and Metrology*, 5, 209–229. <https://doi.org/10.1007/s41871-022-00148-4>.
 6. Rossi, G. B. (2023). A model for indirect measurement. *Measurement*, 214, Article 112798. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112798>.
 7. Darcy, H. (2004). *The public fountains of the city of Dijon* (P. Bobeck, Trans.). Kendal/Hunt Publishing Company. [https://doi.org/10.1061/40683\(2003\)5](https://doi.org/10.1061/40683(2003)5).
 8. Bear, J. (2018). *Modeling phenomena of flow and transport in porous media*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72826-1>.
 9. Whitaker, S. (1999). *The method of volume averaging*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3389-2>.
 10. Washburn, E. W. (1921). The dynamics of capillary flow. *Physical Review*, 17(3), 273–283. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.17.273>.
 11. Hamraoui, A., & Nylander, T. (2002). Analytical approach for the Lucas–Washburn equation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 250(2), 415–421. <https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8288>.
 12. Dimitrov, D. I., Milchev, A., & Binder, K. (2007). Capillary rise in nanopores: Molecular dynamics evidence for the Lucas–Washburn equation. *Physical Review Letters*, 99(5), Article 054501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.054501>.
 13. Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.
 14. Zhang, Y., Wang, N., Xing, F., & Zhou, Y. (2023). Reconstructed hierarchical pore structure of porous SiC ceramics using micro-X-ray computed tomography. *Advanced Engineering Materials*, 25(14), Article 2300039. <https://doi.org/10.1002/adem.202300039>.
 15. Schlumberger, C., & Thommes, M. (2021). Characterization of hierarchically ordered porous materials by physisorption and mercury porosimetry—A tutorial review. *Advanced Materials Interfaces*, 8, Article 2002181. <https://doi.org/10.1002/admi.202002181>.
 16. Rouquerol, J., Llewellyn, P., Rouquerol, F., Baron, G., Denoyel, R., Giesche, H., Groen, J., Klobes, P., Levitz, P., Neimark, A. V., Rigby, S., Skudas, R., Sing, K., Thommes, M., & Unger, K. (2011). Liquid intrusion and alternative methods for the characterization of macroporous materials (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 84(1), 107–136. <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-10-11-19>.
 17. Honda, S., Jia, P., & Daiko, Y. (2022). Gas permeation and thermomechanical properties for macroporous alumina focused on necking size at grain boundaries. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 19(2), 828–837. <https://doi.org/10.1111/ijac.13860>.
 18. Wałowski, G. (2026). Experimental studies of gas permeability through isotropic porous materials in the cubic system. *Applied Sciences*, 16(13), Article 6771. <https://doi.org/10.3390/app16136771>.
 19. Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* (JCGM 100:2008). BIPM.
 20. Rigby, S. P. (2024). Do pores exist?—Foundational issues in pore structural characterisation. *Foundations*, 4(2), 225–248. <https://doi.org/10.3390/foundations4020015>.
 21. Lifton, J. J., Tan Z. J., Goh B., & Mutiargo B. (2022). On the uncertainty of porosity measurements of additively manufactured metal parts. *Measurement*, 188, Article 110616. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110616>.
 22. Joint Committee for Guides in Metrology. (2012). *Evaluation of measurement data — The role of measurement uncertainty in conformity assessment* (JCGM 106:2012). BIPM.
 23. International Organization for Standardization. (2023). *Conformity assessment — General requirements for the competence of proficiency testing providers* (ISO/IEC 17043:2023). ISO.
 24. Hevorkian, E. S., Nerubatskyi, V. P., Gutsalenko, Yu. H., Melnyk, O. M., & Voloshyna, L. V. (2020). Examination of patterns in obtaining porous structures from submicron aluminum oxide powder and its mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(6-108), 41–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216733>.
 25. Nerubatskyi, V. P., Vovk, R. V., Hevorkian, E. S., Hordiienko, D. A., Nazyrov, Z. F., & Komarova, H. L. (2023). Investigation of phase and structural states in nanocrystalline powders based on zirconium dioxide. *Low Temperature Physics*, 49(12), 1277–1285. <https://doi.org/10.1063/1.50021374>.
 26. Hevorkian, E. S., Nerubatskyi, V. P., Chyshkala, V. O., Gutsalenko, Yu. H., Melnyk, O. M., & Voloshyna, L. V. (2024). Technological and innovative features of the electroconsolidation method as a kind of plasma sintering for refractory compounds. *Journal of Superhard Materials*, 46(5), 335–346. <https://doi.org/10.3103/S1063457624050046>.
 27. Honda, S., Hashimoto, S., & Nait-Ali, B. (2022). Characterization of anisotropic gas permeability and thermomechanical properties of highly textured porous alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, 105(10), 6335–6344. <https://doi.org/10.1111/jace.18573>.
 28. Blunt, M. J. (2017). *Multiphase flow in permeable media: A pore-scale perspective*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316145098>.
 29. Ehlers, W., & Wagner, A. (2019). Modelling and simulation methods applied to coupled problems in porous-media mechanics. *Archive of Applied*

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Mechanics, 89, 609–628. <https://doi.org/10.1007/s00419-019-01520-5>.

30. Geohagan, A., & Truszkowska, A. (2024). Finding the dominant properties of porous media: An example of fluid flow. *Multiscale Science and Engineering*, 6, 249–261. <https://doi.org/10.1007/s42493-024-00124-8>.

31. de Mattos, F. N., Molisani, A. L., & Caldeira, L. (2022). Gas permeability and compressive strength evaluation of porous Al₂O₃ supported membrane. *Cerâmica*, 68(385), 46–51. <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683853204>.

32. European Co-operation for Accreditation. (2022). *Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration* (EA-4/02 M:2022). EA.

33. International Organization for Standardization. (2022). *Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison* (ISO 13528:2022). ISO.

Hevorkian E., Komarova H., Voloshyna L., Voloshyn D., Timofeeva L. Metrological assurance of geometric parameter control of porous materials based on the analysis of filtration characteristics.

Abstract. The paper addresses the scientific and practical problem of developing a method for indirect non-destructive evaluation of integral geometric parameters of porous materials for industrial applications. The proposed approach is based on analysing the hydrodynamic and gas-dynamic characteristics of filtration transport of a test gas through a porous structure. Unlike conventional destructive techniques, including metallographic analysis and mercury intrusion porosimetry, the method enables rapid determination of integral characteristics without damaging the product, making it suitable for quality control and diagnostics.

A conceptual model has been developed to establish the relationship between directly measured quantities, namely volumetric gas flow rate and pressure drop across the sample, and structural characteristics, including effective pore diameter and spatial pore concentration. The model is based on a capillary representation of porous media and combines the Hagen–Poiseuille, Washburn and Stokes equations adapted for compressible gaseous media. This enables description of the filtration process using macroscopic parameters while obtaining information about internal pore geometry.

To improve metrological reliability, correction factors are introduced to compensate systematic errors caused by the simplified capillary representation of real porous structures. Two dimensionless coefficients, the conditional permeability and penetration efficiency coefficients, are introduced, improving accuracy of parameter estimation.

A functional system structure has been developed, including a compressed gas unit, pressure and differential pressure sensors, a thermal mass flowmeter, an analogue-to-digital converter, and processing software. The procedure is based on recording gas flow rate and

pressure drop under steady-state conditions followed by indirect determination of pore characteristics.

Particular attention is paid to metrological support. Sensitivity analysis has been performed, and contributions of instruments to combined uncertainty have been evaluated. An uncertainty budget has been compiled according to ISO JCGM. The relative expanded uncertainty of effective pore diameter does not exceed 1.0% for instruments of medium accuracy class.

The method has been validated against an optical microscopy reference using the normalized error criterion *En*. The value $En \leq 1$ confirms agreement within uncertainty limits and verifies metrological suitability.

The study contributes to a modelling approach combining filtration theory, indirect measurement principles and metrological analysis for porous materials, enabling non-destructive control of porous metallic and ceramic products used in engineering, filtration technologies and instrumentation.

Keywords: information and measurement system; non-destructive testing; porous material; pore geometric parameters; gas permeability; indirect measurements; measurement uncertainty; metrological assurance.

Геворкян Едвін Спартакович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0521-3577>.

Комарова Ганна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: komarova@kart.edu.ua. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8597-5891>.

Волошина Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: vol@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2039-111X>.

Волошин Дмитро Ігорович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: voloshin@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4735-5207>.

Тимофєєва Ларіса Андріївна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: timofeevalarisa@ukr.net. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7210-3760>.

Hevorkian Edvin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail:

edsgev@gmail.com. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0521-3577>.

Komarova Hanna, PhD (Tech), Associate Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: komarova@kart.edu.ua. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8597-5891>.

Voloshyna Liudmyla, PhD (Tech), Senior Teacher, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: vol@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2039-111X>.

Voloshyn Dmytro, PhD (Tech), Associate Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: voloshin@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4735-5207>.

Timofeeva Larisa, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: timofeevalarisa@ukr.net. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7210-3760>.

Стаття надійшла 26.08.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 10.09.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.