

УДК 697.952:532.522

Апроксимація параметрів витікання повітря з отворів для моделювання природного повітрообміну

В. О. Мілейковський¹, Л. М. Котелков², О. С. Тригуб³, Д. В. Гузик⁴, О. В., Приймак⁵,
В. О. Єгорченков⁶

¹ д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, v_mil@ukr.net,
ORCID: 0000-0001-8543-1800

² доц., ПрАТ “Вентиляційні системи”, м. Київ, Україна, l.kotelkov@vents.com.ua,
ORCID: 0000-0001-5777-4398

³ к.ф.-м.н., доц., “Національний університет “Києво-Могилянська академія”, м. Київ, Україна, as_trigub@yahoo.com,
ORCID: 0000-0002-6573-2814

⁴ к.т.н., доц. Національний університет “Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка”, м. Полтава, Україна,
Guzikd64@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2130-951X

⁵ д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, 02opriymak@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-9515-9879

⁶ д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, egval@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-2910-0331

Анотація. Хоча природна вентиляція має низьку ефективність і стабільність, її моделювання залишається актуальним на сьогодні. По-перше, більшість усадкованого житлового фонду має природну вентиляцію. По-друге, виробничі приміщення з потужними тепловиділеннями проєктуються саме з використанням природної вентиляції – аерації. Адже повітрообмін у них є занадто великим для забезпечення його механічними системами. А утилізувати теплоту витяжного повітря недоцільно через відсутність поруч споживачів низькопотенційної теплоти. Раніше при розрахунку аерації використовувалися лише значення коефіцієнта витрати отворів у автомобільній області при розрахункових параметрах внутрішнього і зовнішнього повітря. Сучасні підходи вимагають моделювати повітрообмін при змінних внутрішніх і зовнішніх умовах, за яких повітрообмін може набувати як завжди малі значення. При цьому режим роботи отворів виходить за межі автомобільної області. Найбільш універсальним є графік Альтшуля. Комп’ютерний розрахунок не може базуватися на графічних даних і вимагає математичного опису. Однак, Альтшуль надав лише окрему формулу, що описує досить вузький діапазон. У даній роботі запропоновано апроксимацію експериментальних даних. Області, для яких експериментальні дані відсутні, заповнено на базі висловлених у даній роботі припущень. Результати дозволяють виконувати моделювання природного повітрообміну у максимально широких діапазонах зовнішніх факторів.

Ключові слова: природний повітрообмін, аерація, коефіцієнт витрати, коефіцієнт швидкості, витікання з отворів, графік Альтшуля

Вступ. На сьогодні проблема неякісного повітряного середовища постає особливо гостро. Через енергетичну бідність люди не в змозі сплачувати комунальні послуги. Виконання енергоефективної вентиляції неможливе через фінансову неспроможність мешканців.

Оскільки у спадок нам дісталися будинки з природною вентиляцією, мешканці використовують саме природний повітрообмін. Цей повітрообмін характеризується дуже низькою ефективністю [1]. Крім цього, оскільки спонукки природного повітрообміну – природний і вітровий тиск – сильно змінюються навіть протягом доби, то такий повітрообмін є нестабільним. Постає задача його моделювання для перевірки унеможливлення синдрому хворого будинку.

Іншою задачею, пов’язаною з природним повітрообміном, є аерація промислових цехів [2] з великими теплонадлишками. Зазвичай, такі цехи вимагають занадто великого повітрообміну для забезпечення його механічними си-

стемами. Поруч практично завжди немає потужних споживачів теплоти, що унеможливає утилізацію її з витяжного повітря. Тому аерація залишається єдиним на сьогодні рішенням. При реконструкції таких цехів теж виникає задача моделювання фактичного повітрообміну (зворотна задача) [2]. Особливі проблеми виникають при значному зменшенні обсягу виробництва через змінні ринкові умови. При цьому тепловиділення, а значить, і повітрообмін, теж можуть зменшитися. Слід перевірити можливість критичного зниження повітрообміну з погіршенням умов праці.

Зазвичай, аерація проєктується на розрахунковий режим [2] у автомобільній області роботи отворів. Природна вентиляція у квартирах розраховувалася без урахування роботи припливних отворів. А при моделюванні повітрообміну у змінних умовах витрата повітря в отворах може необмежено знижуватися з виходом за межі області автомобільності. Тому постає задача визначення

залежностей, що описують витікання повітря з отворів при різних числах Рейнольдса.

Останні дослідження та публікації. Витікання повітря з отворів досліджувалася в середині ХХ століття. Відомий [3] графік Альтшуля (рис. 1) описує швидкість, витрату і підтиснення потоку в межах числа Рейнольдса

$$Re_o = d_e (2 \Delta p / \rho)^{1/2} / \nu = 13 \dots 102000, \quad (1)$$

де $d_e = 4 A / \Pi$ – еквівалентний діаметр отвору, м, Δp – перепад тиску в отворі, Па; ρ – густина повітря в отворі, кг/м³; A – площа отвору, м², Π – периметр отвору, м.

Основні залежності, що описують витікання повітря з отворів [3]:

- витрата

$$G = \mu A (2 \rho \Delta p)^{1/2}, \quad \text{кг/с}; \quad (2)$$

$$L = \mu A (2 \Delta p / \rho)^{1/2}, \quad \text{м}^3/\text{с}; \quad (3)$$

- швидкість

$$v = \varphi (2 \Delta p / \rho)^{1/2}, \quad \text{м/с}; \quad (4)$$

- площа найбільш вузького перерізу потоку

$$A_o = \varepsilon A, \quad \text{м}^2, \quad (5)$$

де μ – коефіцієнт витрати; φ – коефіцієнт швид-

кості; ε – коефіцієнт стиснення:

$$\mu = \varepsilon \varphi. \quad (6)$$

Слід зауважити, що в ті часи, коли рис. 1 будувалася, не було швидких комп'ютерів. Тому якісні апроксимації складних кривих вимагали значних затрат праці. Криві часто будувалися не за методом найменших квадратів, а від руки за допомогою лекал.

Якщо уважно переглянути графік, то можна помітити суттєве відхилення експериментальних точок від кривої при $Re = 13 \dots 22$ (поз. 1 на рис. 1). Причиною цього є проблема плавного спряження кривих. Без використання сучасних методів апроксимації це виконати практично неможливо.

Таким чином, моделювання повітрообміну вимагає якісних апроксимацій даних графіка Альтшуля. Сучасна комп'ютерна техніка, програмне забезпечення та математичні методи дозволяють ефективно вирішувати подібні задачі навіть за достатньої складності графіків. Серед цих методів слід відзначити:

- метод найменших квадратів, що дозволяє мінімізувати дисперсію неадекватності математичного опису [4];
- сплайн-інтерполяцію, спроможну описувати дуже складні залежності набором простих формул для різних діапазонів області визначення функції.

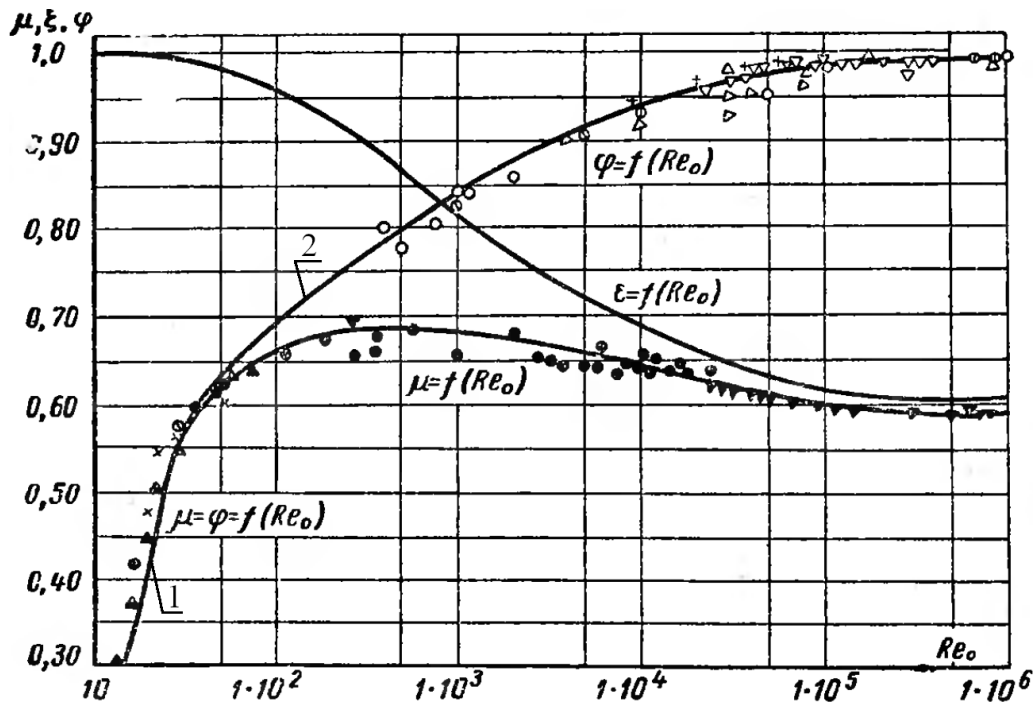


Рис. 1. Графік Альтшуля (скан-копія з [3])

залежності коефіцієнтів витрати μ , швидкості φ та стиснення ε від числа Рейнольдса Re_o :

- 1 – ламінарний режим руху, лінійна зміна коефіцієнтів, спостерігається суттєве недооцінювання дослідних даних;
- 2 – відсутні дослідні дані коефіцієнта швидкості φ , для побудови кривої $\varphi(Re_o)$ потрібні додаткові припущення

Формулювання цілей статті. Метою роботи є апроксимація складних залежностей на графіку Альтшуля для задач моделювання природного повітрообміну.

Основна частина. Спочатку проаналізуємо експериментальні дані на рис. 1. Як бачимо, точки в межах чисел Рейнольдса до 22,2 відхиляються від прямої в межах похибки дослідів. Далі характер розташування точок коефіцієнта витрати раптово змінюється. Це свідчить про кризові явища.

Можливо припустити, що при значеннях числа Рейнольдса біля 22 відбувається перехід від ламінарного до турбулентного режиму. При цьому гладкість кривих може порушитися аналогічно графіку Нікурадзе для труб.

Намагання зберегти гладкість скоріше за все і призвели до потреби зсунути лінію відносно експериментальних точок. В умовах розрахункового повітрообміну приміщень це несуттєво, оскільки число Рейнольдса зазвичай має порядок не нижче 10000. А при моделюванні повітрообміну в довільних умовах може виникнути груба помилка. Порушення гладкості залишає більше свободи для побудови кривих.

При побудові коефіцієнта витрати постає проблема відсутності експериментальних точок при числах Рейнольдса $Re_o = 22,2...393$. Тому для побудови у відповідній області прийдеться приймати додаткові припущення.

Одним з таких припущень може бути плавність зміни коефіцієнта стиснення ϵ без особливих точок (екстремумів, перегинів) у даному діапазоні. Цей коефіцієнт не може перевищити одиницю, оскільки це означатиме розширення течії після проходження отвору. Подібне не було помічене за всю історію досліджень подібних явищ.

Показаний на рис. 1 максимум при числі Рейнольдса біля 13 можна пояснити лише плавністю побудови кривої. Насправді збіг кривих коефіцієнтів витрати і швидкості свідчить про відсутність стиснення $\epsilon \equiv 1$.

На підставі наведених міркувань апроксимацію будемо проводити таким чином. Спочатку апроксимуємо дослідні точки при ламінарному режимі.

За фізичним змістом при нульовому числі Рейнольдса $\varphi = \mu = 0$. Отже, апроксимаційна формула має лише один апроксимаційний коефіцієнт K :

$$\varphi = \mu = K Re_o. \quad (7)$$

За методом найменших квадратів формула (7) набуде вигляду (рис. 3)

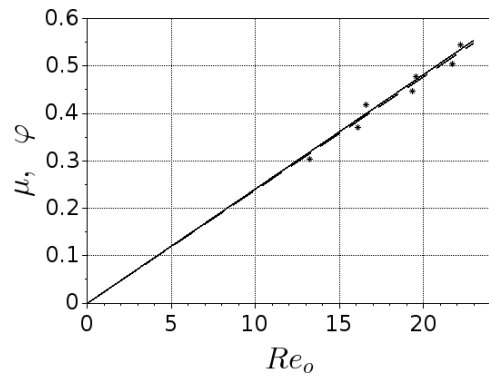


Рис. 2. Апроксимація коефіцієнтів витрати φ та швидкості μ в ламінарному режимі: пунктир – рівняння (8); суцільна лінія – рівняння (9)

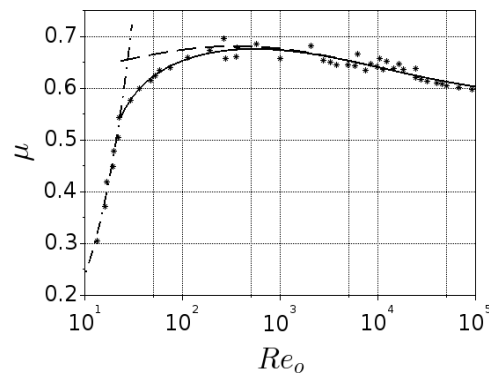


Рис. 3. Апроксимація коефіцієнта витрати в турбулентному режимі: пунктир – рівняння (10); суцільна лінія – рівняння (11); штрих-пунктир – рівняння (9) для ламінарної течії

$$\varphi = \mu = 0,02385 Re_o. \quad (8)$$

Відхилення від експериментальних точок кривої (8) перевищує допустиме (до 5 %) і становить 5,6 %. Тому оптимізуємо коефіцієнт K для досягнення найменшого максимального відхилення апроксимаційних і дослідних даних у відсотках. Матимемо

$$\varphi = \mu = 0,024093 Re_o. \quad (9)$$

Відхилення отриманої формули від дослідних точок знижується до допустимого – 4,61 %. Розбіжність між формулами (8) та (9) становить лише $100(0,024093 - 0,02385)/0,02385 = 1,02\%$. А підвищення похідної спрощує подальшу апроксимацію для турбулентного режиму.

Звернемо увагу, що точне значення критичного числа Рейнольдса невідоме. Тому його слід визначити наближено як точку перетину апроксимаційних кривих для обох режимів.

Тільки для коефіцієнта витрати є достатньо експериментальних даних в усьому діапазоні. Залежність цього коефіцієнта виражається складною кривою з максимумом і перегином.

Показаний мінімум при $Re_o = 60000$ є умовним і не витікає з точок. Навпаки, точки дозволяють припустити асимптотичний характер зміни коефіцієнта при зростанні числа Рейнольдса.

Навіть за зазначених обмежень існує нескінченна кількість різних апроксимаційних функцій. Перебір різних асимптотичних функцій дозволив описати точки при $Re_o > 1000$ апроксимаційною функцією вигляду

$$\varphi = \mu = A + e^{a \ln^2(Re_o) + b \ln(Re_o) + c}, \quad (10)$$

причому апроксимаційні коефіцієнти a , b і c мають давати від'ємний степінь, а коефіцієнт A визначає горизонтальну асимптоту.

Рис. 3 показує, що формула (10) добре описує експериментальні дані при $Re_o > 1000$. При апроксимаційних параметрах $-1 < p < 0$ та $B > 0$ можна досягти ефекту, коли поправка виправляє лише значення при $Re_o < 1000$ і практично не впливає на значення при $Re_o > 1000$. Це дозволяє уникнути сплайн-інтерполяції і досягти максимальної гладкості функції.

Метод найменших квадратів дає формулу після застосування схеми Горнера до степеня:

$$\mu = 0,5776 + e^{(0,5203 - 0,04436 \ln(Re_o)) \ln(Re_o) - 3,794 - (Re_o - 9,8)^{-0,857}}. \quad (11)$$

Відхилення від дослідних значень не перевищує 3,32 %. Критичне число Рейнольдса знаходиться як точка перетину відповідних кривих чисельним розв'язанням системи рівнянь (8) та (11). Результати представлено з максимальною точністю для одержання неперервних ламаних та з інженерною точністю для ручних розрахунків:

$$Re_{o,cr} = 22,26240088847105 \approx 22,3; \quad (12)$$

$$\varphi_{cr} = \mu_{cr} = 0,536368024605933 \approx 0,536; \quad (13)$$

За необхідності чисельного розв'язання або інтегрування рівнянь, пов'язаних з витіканням з отворів, приходиться використовувати саме ці "точні" значення. Хоча зайві цифри є по суті випадковими, однак їхнє відкидання призводить до порушення неперервності функції та збоїв багатьох чисельних алгоритмів, що передбачають саме неперервність.

Дослідні точки для коефіцієнта швидкості φ в турбулентному режимі (рис. 1) обмежені значеннями $392,46 \geq Re_o \geq 98809$. При більших числах Рейнольдса можна припустити асимптотичний характер зміни кривої.

Значення асимптоти $\varphi(Re \rightarrow \infty) = 1$ можна припустити відповідно до наближення дослі-

дних точок до одиниці. У зазначеному діапазоні функція не має особливих точок. Оскільки відносно розсіювання дослідних точок (рис. 1) невелике, функцію підбирати- мемо лише задля малого відхилення від них. Звичайно, такий вибір не може бути одно- значним.

У даній роботі шляхом перебору функцій прийнято

$$\varphi = 1 - (B/Re_o^q), \quad (14)$$

а значення апроксимаційних параметрів B і q визначено за методом найменших квадратів. Рівняння (14) набуває вигляду

$$\varphi = 1 - (2,93/Re_o^{0,4206}). \quad (15)$$

Відхилення від дослідних точок є допустимим і не перевищує 4,73 %. Оскільки значення $Re_o = 392,46$ не має специфічного фізичного змісту, заокруглюємо його до 390.

У діапазоні $Re_{o,cr} < Re_o < 390$ не вистачає підстав для висловлення обґрунтованих припущень. Можна лише стверджувати подвійну гладкість функції при $Re_o = 390$, неперервність при $Re_{o,cr}$ і відсутність особливих точок.

В ідеалі гладкість мала би бути нескінченною. Однак, це вимагатиме створення дуже складної функції, що у практиці сплайн-інтерполяції не виконується. Зазвичай, для реалізації більшості чисельних алгоритмів подвійної гладкості вистачає. Зазначеним умовам відповідатиме безліч кривих, причому підстав для вибору конкретної з них немає.

З іншого боку, аналогічні припущення можна висловити й про функцію $\varepsilon(Re_o)$. А через значну кривину функції $\varphi(Re_o)$ та зв'язок (6) ці умови стають дуже жорсткими. За адекватний час не вдалося підібрати просту функцію $\varphi(Re_o)$, яка б відповідала всім умовам для обох кривих.

Щоб пришвидшити апроксимацію звернемо увагу на криву ε на рис. 1. Ця крива досить проста, що дозволяє спробувати побудувати саме її. За формулами (6), (11) і (15) при $Re_o > 390$

$$\varepsilon = \mu / \varphi = \frac{0,5776 + e^{(0,5203 - 0,04436 \ln(Re_o)) \ln(Re_o) - 3,794 - (Re_o - 9,8)^{-0,857}}}{1 - 2,93 Re_o^{-0,4206}}. \quad (16)$$

За допомогою системи символної алгебри Махіма в оболонці WxMaxima виконано взяття похідної (не наведена через громіздкість) функції (16) і підраховано значення ε та

$d\varepsilon/dRe_o$ при $Re_o = 390$. При $Re_{o,cr}$ за формулою (6) $\varepsilon = 1$. Далі в цих же програмах сформовано найпростіший багаточлен, що відповідає зазначеним чотирьом обмеженням – неперервності в обох точках стикування та неперервності першої й другої похідної при $Re_o = 390$. Цей багаточлен повинен мати чотири апроксимаційні коефіцієнти, а значить є кубічним. Підставлення зазначених умов однозначно визначає багаточлен

$$P(Re_o) = ((1,329196682679387 \cdot 10^{-9} Re_o - 9,95064770836189 \cdot 10^{-7}) Re_o - 1,141796765185271 \cdot 10^{-4}) Re_o + 1,003020416471492. \quad (17)$$

Коефіцієнти багаточлена (12) з максимальною точністю наведено для уникнення незначних розривів і зламів. Отримані криві відповідають усім поставленим умовам (рис. 4).

Слід зазначити, що значення $Re_o = 390$ не можна вважати певним перехідним або другим критичним. Воно виникло лише через обмеження діапазону, у якому на сьогодні виконано експериментальні дослідження. Його можна вважати ще однією апроксимаційною константою, що має лише історичні передумови без явного фізичного змісту.

Отримані результати використовуються при комп'ютерному моделюванні природного повітрообміну для перетікання повітря крізь двері та відчинені вікна. Відповідні залежності за рівняннями (9), (11), (12), (13), (15), (16) і (17) матимуть вигляд:

$$\mu = \begin{cases} 0,024093 Re_o, & Re_o \leq Re_{cr}, \\ 0,5776 + e^{(0,5203 - 0,04436 \ln |Re_o|) \ln |Re_o| - 3,794} - (Re_o - 9,8)^{-0,857}, & Re_o > Re_{cr}; \end{cases} \quad (18)$$

$\varphi =$

$$= \begin{cases} 0,024093 Re_o, & Re_o \leq Re_{cr}, \\ \left(0,5776 + e^{(0,5203 - 0,04436 \ln |Re_o|) \ln |Re_o| - 3,794} - (Re_o - 9,8)^{-0,857} \right) / P, & Re_{cr} < Re_o < 390, \\ 1 - 2,93 Re_o^{-0,4206}, & Re_o \geq 390; \end{cases} \quad (19)$$

$\varepsilon =$

$$= \begin{cases} 1 & Re_o \leq Re_{cr}, \\ P, & Re_{cr} < Re_o \leq 390, \\ \left(0,5776 + e^{(0,5203 - 0,04436 \ln |Re_o|) \ln |Re_o| - 3,794} - (Re_o - 9,8)^{-0,857} \right) \div \left(1 - 2,93 Re_o^{-0,4206} \right), & Re_o > 390, \end{cases} \quad (20)$$

причому поліном P розраховується за формулою (17).

Отже, отримані залежності (17), (18), (19) і (20) дозволяють розрахувати параметри витікання повітря з отворів для задач моделювання повітрообміну. Відхилення від дослідних даних не перевищує 4,78 %. Широкий діапазон числа Рейнольдса дозволяє виконувати розрахунки за будь-яких зовнішніх та внутрішніх умов.

Висновки. Апроксимація графіка Альтшуля дозволила отримати формули параметрів витікання повітря з отворів для задач моделювання повітрообміну при змінних умовах навколишнього середовища. Відхилення від дослідних даних становить не більше 4,78 % в усьому діапазоні числа Рейнольдса.

Перспектива подальших досліджень. З використанням отриманих формул за підтримки ПрАТ “Вентиляційні системи” створено симулятор повітрообміну в простій однокімнатній квартирі. Завершується моделювання на ньому повітрообміну при різних режимах експлуатації квартири з оцінюванням якості внутрішнього повітря.

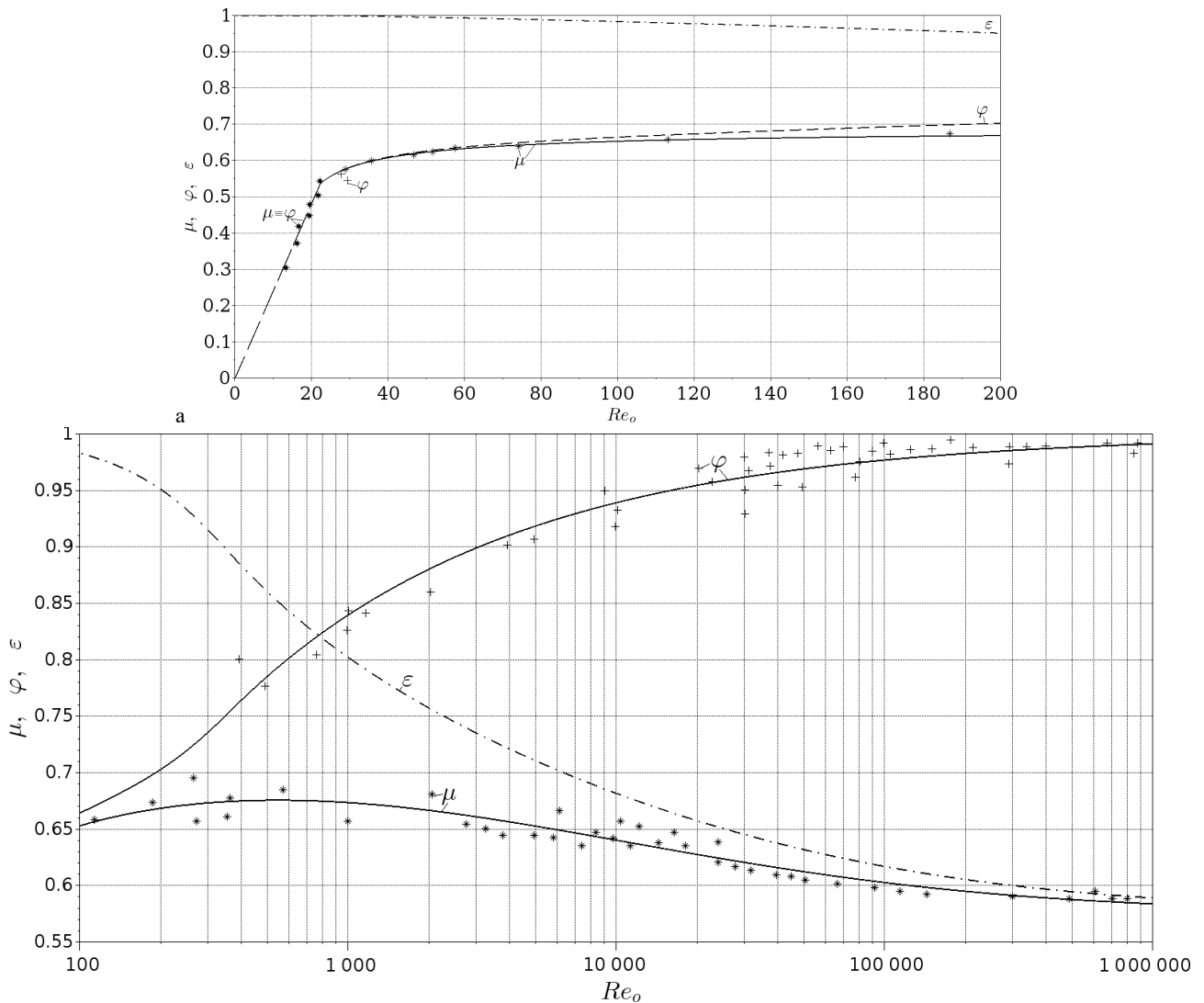


Рис. 4. Графік Альтшуля залежності коефіцієнтів витрати μ , швидкості φ та стиснення ε від числа Рейнольдса Re_o за даними отриманої апроксимації:

а – при числі Рейнольдса до 200; б – при числі Рейнольдса від 100 до 1 000 000.

Література

1. Мілейковський В. О. Аналітичні дослідження енергетичної ефективності природної вентиляції / В. О. Мілейковський, Г. М. Клименко // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. - 2016. - Вип. 20. - С. 39-45. - Режим доступу: <http://vothp.knuba.edu.ua/article/view/168453>.
2. Довгалюк В. Б. Аеродинаміка вентиляції. – Київ: ІВНВП «Укреліотех», 2015. – 366 с. –
3. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости) / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселёв. – Москва: Стройиздат, 1965. – 273 с. – Режим доступу: https://www.studmed.ru/altshul-ad-kiselev-pg-gidravlika-i-aerodinamika-osnovy-mehaniki-zhidkosti_30e1f5387b9.html.
4. Мілейковський В. О. Експериментальні аеродинамічні дослідження вентиляційних систем / В. О. Мілейковський. – Київ.: Юстон, 2021. – 217 с. – Режим доступу: <http://library.knuba.edu.ua/books/Експериментальні%20аеродинамічні%20дослідження%20вентсистем.pdf>
5. Späth H. One Dimensional Spline Interpolation Algorithms / H. Späth. – A K Peters/CRC Press, 1995. 416 p.

References

1. Mileikovskiy V. O., Klymenko H. M. "Analytichesni doslidzhennia enerhetychnoi efektyvnosti pryrodnoi ventyliatsii". *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia*. Vyp. 20., 2016, pp. 39-45.
2. Dohaliuk V. B. *Aerodynamika ventyliatsii*. IVNVKP "Ukrheliotech", 2015.
3. Altshul A. D., Kiseliov P. G. *Hidravlika i aerodinamika (osnovy mekhaniki zhydkosti)*. Stroiizdat, 1965.
4. Mileikovskiy V. O. *Eksperymentalni aerodynamichni doslidzhennia ventyliatsiinykh system*. Yuston, 2021.

5. Späth H. *One Dimensional Spline Interpolation Algorithms*. A K Peters/CRC Press, 1995.

УДК 697.952:532.522

Аппроксимация параметров истечения воздуха из отверстия для моделирования естественного воздухообмена

В. А. Милейковский¹, Л. М. Котелков², А. С. Тригуб³, Д. В. Гузик⁴, А. В. Приймак⁵,
В. А. Егорченков⁶

¹ д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, v_mil@ukr.net,
ORCID: 0000-0001-8543-1800

² доцент, ПрАТ “Вентиляционные системы”, г. Киев, Украина, l.kotelkov@vents.com.ua,
ORCID: 0000-0001-5777-4398

³ к.ф.-м.н., “Национальный университет “Киево-Могилянская академия”, г. Киев, Украина, as_trigub@yahoo.com,
ORCID: 0000-0002-6573-2814

⁴ к.т.н., Национальный университет “Полтавская политехника им. Юрия Кондратюка”, г. Полтава, Украина,
Guzikd64@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2130-951X

⁵ д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, 02opriymak@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-9515-9879

⁶ д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, egval@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-2910-0331

Аннотация. Хотя естественная вентиляция имеет низкую эффективность и стабильность, её моделирование остаётся актуальным на сегодня. Во-первых, большинство унаследованного жилого фонда имеет естественную вентиляцию. Во-вторых, производственные помещения с мощными тепловыделениями проектируются именно с использованием естественной вентиляции - аэрации. Ведь воздухообмен в них слишком велик для обеспечения его механическими системами. А утилизировать теплоту вытяжного воздуха нецелесообразно из-за отсутствия близких потребителей низкопотенциальной теплоты. Ранее при расчете аэрации использовалось только значение коэффициента расхода отверстий в автомобильной области при расчётных параметрах внутреннего и наружного воздуха. Современные подходы требуют моделировать воздухообмен при переменных внутренних и внешних условиях, при которых воздухообмен может принимать сколь угодно малые значения. При этом режим работы отверстий выходит за пределы автомобильной области. Наиболее универсальным есть график Альтишуля. Компьютерный расчёт не может базироваться на графических данных и требует математического описания. Однако, Альтишуль предоставил только формулу, описывающую достаточно узкий диапазон. В данной работе предложена аппроксимация экспериментальных данных. Области, для которых экспериментальные данные отсутствуют, описаны на базе высказанных в данной работе предположений. Результаты позволяют моделировать естественный воздухообмен в максимально широких диапазонах внешних факторов.

Ключевые слова: естественный воздухообмен, аэрация, коэффициент расхода, коэффициент скорости, истечение из отверстий, график Альтишуля

UDC 697.952:532.522

Approximation of the parameters of air outflow from the hole to simulate natural air exchange

V. Mileikovskiy¹, L. Kotelkov², O. Tryhub³, D. Guzyk⁴, O. Pryimak⁵, V. Yehorchenkov⁶

¹ Dr. Hab., prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, v_mil@ukr.net,
ORCID: 0000-0001-8543-1800

² assoc. prof., PJSC "Ventilation systems", Kyiv, Ukraine, l.kotelkov@vents.com.ua, ORCID: 0000-0001-5777-4398

³ PhD., “National University “Kyiv-Mohyla Academy”, Kyiv, Ukraine, as_trigub@yahoo.com,
ORCID: 0000-0002-6573-2814

⁴ PhD., assoc. prof. National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, Poltava, Ukraine, Guzikd64@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-2130-951X

⁵ Dr Hab, prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 02opriymak@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-9515-9879

⁶ Dr Hab, prof. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, egval@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-2910-0331

Abstract. Although natural ventilation has low efficiency and stability, its simulation remains relevant today. First, most of the legacy buildings are naturally ventilated. Secondly, production facilities with powerful heat emissions are designed precisely with the use of natural ventilation – aeration. After all, the air exchange in them is too great to provide it with mechanical systems. Finally, it is impractical to utilize the heat of the exhaust air due to the lack of close consumers of low-grade heat. Previously, when calculating aeration, only the value of the coefficient of the flow rate of holes in the self-similar area was used for the calculated parameters of the indoor and outdoor air. Modern approaches require modeling air exchange under variable internal and external conditions, under which air exchange can take arbitrarily small values. In this case, the mode of operation of the holes goes beyond the self-similar area. The most versatile is the Altshul chart. The diagram was built before the advent of powerful computers. Therefore, obtaining sufficiently accurate approximations of complex curves was a very time consuming task. In most cases, builds were done manually. At the same time, in the region of a small Reynolds number, a significant underestimation of the experimental data is noticeable. Computer calculations cannot be based on graphical data and requires a mathematical description. However, Altshul provided only a formula describing a fairly narrow range. In this paper, an approximation of the experimental data is proposed. The regions for which experimental data are absent are described on the basis of the assumptions made in this work. The results make it possible to simulate natural air exchange in the widest possible range of external factors.

Keywords: natural air exchange, aeration, flow coefficient, velocity coefficient, outflow from holes, Altshul graph

Надійшла до редакції / Received 18.05.2021