

**Петро ЗІНИЧ**

канд. техн. наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-8991-476X>

Інститут інноваційної освіти Київського національного університету  
будівництва та архітектури

**Сергій РИБАЧОВ**

канд. техн. наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-0093-9750>

Київський національний університет будівництва і архітектури

## **ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН, ЩО ВИДІЛЯЮТЬСЯ ЧЕРЕЗ НЕЩІЛЬНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ПОВІТРООБМІНУ В ПРОМИСЛОВИХ СПОРУДАХ**

*У статті розглянуто актуальну проблему визначення кількості шкідливих речовин, що виділяються в повітря робочої зони через нещільності технологічного обладнання промислових підприємств. До таких джерел належать фланцеві з'єднання, сальникові ущільнення, різьбові стики та мікродефекти матеріалів, які в процесі експлуатації втрачають герметичність. Показано, що навіть незначні витіки можуть суттєво впливати на концентрацію небезпечних домішок у виробничому середовищі, особливо за умов підвищеного тиску або температури робочого середовища.*

*Обґрунтовано, що забезпечення нормативного повітрообміну в промислових будівлях і спорудах безпосередньо залежить від достовірної оцінки масових викидів шкідливих речовин. Недооцінка витоків призводить до перевищення гранично допустимих концентрацій, тоді як їх переоцінка зумовлює нераціональне збільшення енерговитрат вентиляційних систем. У зв'язку з цим особливою актуальності набуває розроблення уточнених методичних підходів до визначення фактичних обсягів виділень через нещільності.*

*У роботі запропоновано комплексний підхід, що поєднує аналітичне моделювання витоків на основі рівнянь гідродинаміки стисливих середовищ, експериментальні дослідження характеристик різних типів ущільнень та статистичну обробку результатів натурних вимірювань на промислових об'єктах. Встановлено емпіричні залежності між надлишковим тиском у технологічному обладнанні, геометричними параметрами нещільностей (зокрема площею умовного проходу) та масовою витратою газу або пари, що витікає.*

*Отримані результати дозволяють уточнити розрахунок повітрообміну для систем загальнообмінної та місцевої вентиляції, зокрема при проектуванні локальних відсмоктувачів у зонах потенційних витоків. Запропонована методика сприяє зменшенню надлишкового резерву продуктивності вентиляційного обладнання, підвищенню енергоефективності систем забезпечення мікроклімату та покращенню умов праці. Крім того, підвищується достовірність оцінювання професійних ризиків для обслуговуючого персоналу, що є важливим чинником забезпечення виробничої безпеки та надійності.*

**Ключові слова:** технологічне обладнання, шкідливості, повітрообмін,

**мікроклімат промислових будівель.**

**Постановка проблеми.** Сучасна промисловість неможлива без широкого використання механізмів з пневматичними чи гідравлічними приводами. Вони забезпечують високу продуктивність, точність і надійність виконавчих механізмів від конвеєрів до важких пресів та верстатів. Однак, поряд з очевидними перевагами, експлуатація такого обладнання створює певні особливості роботи систем формування мікроклімату та безпеки промислової споруди.

Ключова проблема полягає в тому, що герметичність гідравлічних і пневматичних систем не є абсолютною. В процесі роботи неминучі мікрОВитоки, а при аварійних ситуаціях — раптові розриви шлангів, пошкодження ущільнень або помилки персоналу можуть призвести до значних викидів робочої рідини або стисненого повітря в робочу зону.

Як правило до 98% виділень шкідливих речовин надходить у повітря приміщень внаслідок витоків через нещільність рухомих з'єднань (сальникові ущільнення). Нерухомі фланцеві з'єднання при нормальній експлуатації не відіграють істотної ролі в забрудненні повітря, тому що на їхню частку припадає не більше 2% всіх витоків. Така різниця витоків пояснюється різними умовами роботи та зносу роз'ємних з'єднань під час експлуатації.

Варто розглянути закономірність витoku шкідливих речовин через нещільності в ущільненнях з постійними малими зазорами в місцях проходу валу, штока, шпинделя або штовхача в стінках корпусу апаратів, машин, печей та інших пристроїв.

Ущільнення з малим постійним зазором досягають шляхом точного пришліфування та притирання деталей. Такі ущільнення застосовують із зазором не менше 0,2-0,5 мм з тим, щоб забезпечити роботу валу, що обертається, штока або шпинделя при згині, нагріванні або вібрації і уникнути можливості тертя в парі з нерухою частиною корпусу апарату, машини.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** Розрахунок кількості шкідливих речовин, що виділяються через нещільності технологічного обладнання для організації вентиляції приміщень, займалися та продовжують займатися дослідники в галузі промислової гігієни, фахівці з вентиляції, а також інженери-технологи. Їхні напрацювання лягли в основу сучасних міжнародних та національних стандартів [1,2].

Над цією проблемою працювали як окремі дослідники, так і великі професійні асоціації, результатом чого було закладено фундаментальні принципи, які використовуються зараз [6].

Розроблено і опубліковано методологію, яка дозволяє оцінити концентрацію токсичних речовин у зоні дихання працівника. Цей метод враховував потенціал витoku потенційних шкідливостей з обладнання (наприклад, насосів і клапанів), швидкість їх випаровування та розбавлення у повітрі [7].

Як правило використовувались рівняння масового або об'ємного балансу для розрахунку концентрації газу в шафах та лабораторіях. Було введено поняття "коефіцієнт неідеальності перемішування", який визнає, що повітря в приміщенні змішується не ідеально. Для лабораторій рекомендовано значення  $k = 0,3$ , а для невеликих шаф —  $k = 1$  (ідеальне змішування) [3].

Наразі провідну роль відіграють міжнародні організації зі стандартизації та регуляторні органи, що розробили норми і правила для випробувань арматури та з'єднань, а також класи герметичності для них.

Державні національні документи з охорони та захисту навколишнього середовища є ключовими регуляторами у цій сфері.

**Актуальність і новизна.** Актуальність дослідження визначення кількості шкідливих речовин, що виділяються через нещільності технологічного обладнання, обумовлена комплексом взаємопов'язаних факторів, які впливають на безпеку праці, економіку виробництва, екологію та відповідність законодавству.

Забезпечення безпеки праці та здоров'я персоналу це найважливіший фактор, що враховує ризик хронічних захворювань (професійні захворювання, ураження печінки, нирок, нервової системи, респіраторні захворювання), ризик гострих отруєнь (при раптовому збільшенні витоку), вибухопожежна безпека (для горючих газів і парів легкозаймистих рідин витоки створюють потенційні вибухонебезпечні зони).

*Відповідність законодавству та нормативним вимогам.* Сучасне промислове законодавство висуває жорсткі вимоги до робочих зон та викидів в атмосферу (гранично допустимі концентрації (ГДК), нормування викидів в атмосферу).

*Економічна доцільність та енергоефективність.* Вентиляція промислових споруд є одним із найбільших споживачів електроенергії. Невірний розрахунок та завищення повітрообміну призводить до колосальних фінансових збитків.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставленого завдання було розглянуто варіант рівномірного ламінарного потоку речовини в поперечному перерізі кільцевої щілини шириною  $b$  довжиною  $l$  навколо валу діаметром  $D$ .

Диференціальне рівняння руху рідини буде:

$$(P_1 - P_2)dx = ldt$$

де  $\tau$  – напруження внутрішнього тертя по закону Ньютона:

$$\tau = -\mu \frac{dU}{dx}$$

де  $\mu$  – кінематична в'язкість речовини, г/см с;

$\frac{dU}{dx}$  – градієнт швидкості в поперечному перерізі щілини.

Швидкість на осі умовного каналу буде:

$$U_0 = \frac{\Delta P b^3}{8\mu l}$$

Об'ємна витрата речовини, що витікає:

$$dq_v = \pi D U dx$$

Середня швидкість  $\bar{U}$  знаходиться:

$$\bar{U} = \frac{q_v}{\pi D b} = \frac{\Delta P b^2}{12\mu l}$$

де  $\Delta P$  – перепад тисків, Па;

$l$  – довжина кільцевої щілини, мм;

$U$  – швидкість витоку, м/сек;

$b$  – ширина кільцевої щілини, мм.

Масова витрата речовини знаходиться:

$$q = \alpha \pi D b \bar{U} \varphi$$

або ж:

$$q = \alpha \varphi \frac{\Delta P \pi D b^3}{12 \mu l}$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт витрати речовини;

$\varphi$  – об'ємна вага речовини, г/см<sup>3</sup>;

$q$  – кількість витоку, кг/с.

Для гладкої щілини:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\frac{\lambda l}{2b} + 1,5}}$$

Відомо, що у разі гладких поверхонь для  $\lambda$  буде працювати закон Блазіуса:

$$\lambda = 0,3164 Re^{-0,25}.$$

Для визначення  $\lambda = f(Re)$  та критичного значення числа  $Re$  приймають кільцеві щілини із значеннями  $b = 0,2; 0,5; 1,0; 1,5$  та  $2,0$  мм, що мають повну гідравлічну подоби (гостру вхідну кромку та постійну відносну довжину  $\frac{l}{b} = 150$ ).

Досліди проводилися на експериментальному аеродинамічному стенді, що мав модель кільцевої щілини, в різних точках якої замірялися перепади тиску і температури. Для цього від компресора підводилося повітря через ресивер, що очищається у фільтрах для стабільності та чистоти повітря. Тиск у системі підтримувався 0,4 МПа, температура змінювалася від 20 до 120 °С.

Вимірювання втрат тиску та абсолютних тисків повітря здійснювалося електронними манометрами.

Обробка отриманих даних проводилась згідно з теорією подібності, результати експериментів представлені у вигляді критеріальних залежностей  $\lambda = f(Re)$ .

При неізотермічному режимі течії всі фізичні константи повітря визначалися за середньоарифметичним значенням з температур стінки та потоку, що вимірюються хромель-алюмінієвими термопарами.

Аналіз моделі показав, що у всіх досліджених випадках ширина каналу не впливає на протяжність областей режимів течії. Нижнє критичне значення числа Рейнольдса знаходиться в межах 1000-1300, а область розвиненої турбулентності спостерігається при верхньому критичному числі Рейнольдса понад 1900. При ламінарному режимі течії результати експериментів опрацьовано по методу Шиллера і коефіцієнт тертя був в межах  $\lambda=2,3-2,6$ .

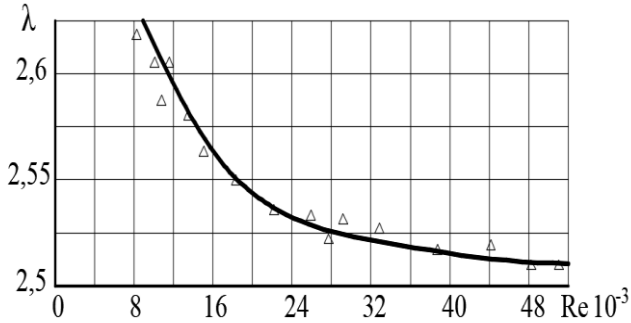


Рис.1. Сумарний коефіцієнт опору початкової ділянки  
 $\Delta$  – дослідні точки для  $b=2,0$  мм

При турбулентному режимі течії сумарне значення  $\lambda$  залежить від режиму течії та умов входу до щілини. На основі даних для щілини  $b=2,0$  мм та витікання через  $25b$ , сумарний коефіцієнт співставлення буде:

$$\lambda = (\lambda_1 - \lambda_\infty) \frac{y}{2b},$$

де  $\lambda_1$  – коефіцієнт опору початкової ділянки,

$\lambda_\infty$  - коефіцієнт опору довжини  $u$  при встановленому профілі швидкості.

$$\lambda_1 = \frac{\Delta P}{\frac{U^2 \varphi}{2a} \cdot \frac{y}{2b}}.$$

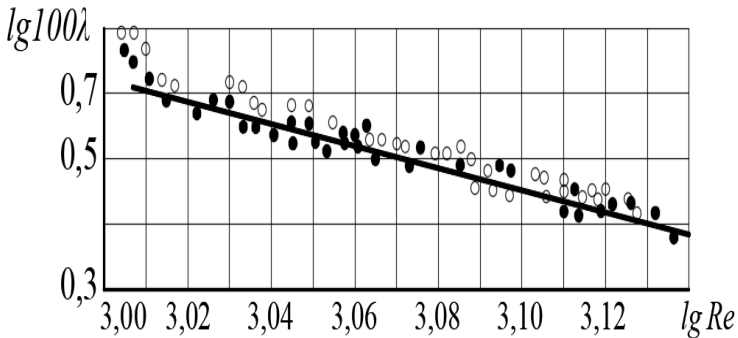


Рис.2. Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса при неізотермічній течії в кільцевій щілині • - для  $b=0,5$  мм,  $\circ$  - для  $b=2,0$  мм

Оброблені зазначеним методом дослідні дані представлені на рис. 1 і свідчать про зменшення втрат на початковій ділянці зі збільшенням критерію Рейнольдса.

При неізотермічному перебігу протяжність і характер області змінних режимів сильно залежить від інтенсивності теплообміну. У всіх досліджених випадках перехід від ламінарного режиму до турбулентного відбувається плавно, що свідчить про значну турбулізацію потоку силами вільної конвекції; при вирівняному профілі швидкостей, характерному для великих чисел Рейнольдса, вплив теплообміну практично не проявляється (рис. 2). Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса, визначено до і після нагрівання капіляра, повністю збігається, що свідчить про незмінності внутрішньої поверхні щілин (див. рис. 2).

**Висновки та рекомендації подальшого дослідження.** Навіть герметичні за паспортом обладнання мають мікро- та макронещільності (фланці, сальники, зварні шви, клапани), через які в робочу зону надходять шкідливі чи пожежонебезпечні речовини, що являють собою приховані джерела забруднення, які важко виявити стандартними методами.

Спрошені методи розрахунку шкідливостей (введення в розрахунки узагальнений коефіцієнт витoku тощо) не враховують реальні розподіли розмірів нещільностей в технологічному обладнанні, перепад тиску в їх системах зі зміною в часі, фізико-хімічні властивості середовища (в'язкість, тиск пари, схильність до конденсації). Це призводить до похибки у визначенні необхідного повітрообміну і відповідно підбору вентиляційного обладнання.

Подальший розвиток цієї проблематики доцільно спрямувати на розробку багатofакторних математичних моделей витoku через реальні нещільності (з урахуванням форми каналу, шорсткості, турбулентності, двофазного потоку) на основі CFD-моделювання з верифікацією на стенді. Для практичного використання створити класифікацію типових нещільностей для основних видів обладнання (насоси, компресори, арматура) з експериментально визначеними коефіцієнтами витoku залежно від перепаду тиску та агрегатного стану.

#### *Список літератури:*

1. Про охорону атмосферного повітря: Закон України від № 2707-ХІІ від 16.10.1992, з редакціями. Відомості Верховної Ради України. 1992 № 50, ст.678.
2. ДБН Б.2.2-12:2019 Планування та забудова територій. Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово- комунального господарства України від 26.04.2019 р. № 104
3. Powell R Estimating Worker Exposure to Gases and Vapors Leaking from Pumps and Valves American Industrial Hygiene Association Journal (1984) 45(11) A-7-A-15 <https://doi.org/10.1080/15298668491400629>
4. Sprow F. B. Distribution of drop sizes produced in turbulent liquid - liquid dispersion. // Chem. Eng. Sci., 1967, 22, № 3.
5. Ou Han, Ying Zhang, Angui Li, Jianwei Li, Yuwei Li, Huagan Liu Experimental and numerical study on heavy gas contaminant dispersion and ventilation design for industrial buildings. Sustainable Cities and Society Volume 55, April 2020, 102016 <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102016>
6. Xingwang Zhao, Yonggao Yin Hazards of pollutants and ventilation control strategy in industrial workshops: Current state and future trend. Building and Environment Volume 251, 1 March 2024, 111229 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111229>
7. O. Seuntjens, B. Belmans, M. Buyle, A. Audenaert A critical review on the adaptability of ventilation systems: Current problems, solutions and opportunities

Building and Environment Volume 212, 15 March 2022, 108816  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108816>

8. Корбут В. П., Рибачов С. Г. Вплив висоти бортів промислової ванни з нагрітою рідиною на параметри конвективного потоку. / Корбут В. П., Рибачов С. Г. // Просторовий розвиток – Випуск 10. – К.: КНУБА, 2024 – С.358–364.  
<https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.358-364>

***Petro ZINUCH, Serhii RYBACHOV***

***Determination of the amount of harmful substances released due to leaks in technological equipment for organizing air exchange in industrial facilities***

*The article considers the current problem of determining the amount of harmful substances released into the air of the working area due to leaks in the technological equipment of industrial enterprises. Such sources include flange connections, gland seals, threaded joints and microdefects of materials that lose their tightness during operation. It is shown that even minor leaks can significantly affect the concentration of hazardous impurities in the production environment, especially under conditions of increased pressure or temperature of the working environment.*

*It is substantiated that ensuring regulatory air exchange in industrial buildings and structures directly depends on a reliable assessment of mass emissions of harmful substances. Underestimation of leaks leads to exceeding the maximum permissible concentrations, while their overestimation leads to an irrational increase in energy consumption of ventilation systems. In this regard, the development of refined methodological approaches to determining the actual volumes of emissions due to leaks becomes particularly relevant.*

*The paper proposes a comprehensive approach that combines analytical modeling of leaks based on equations of hydrodynamics of compressible media, experimental studies of the characteristics of various types of seals, and statistical processing of the results of field measurements at industrial facilities. Empirical relationships between the excess pressure in process equipment, geometric parameters of leaks (in particular, the area of the conditional passage) and the mass flow rate of leaking gas or steam have been established.*

*The results obtained allow us to refine the calculation of air exchange for general and local ventilation systems, in particular when designing local exhaust fans in areas of potential leaks. The proposed methodology helps to reduce the excess reserve of ventilation equipment performance, increase the energy efficiency of microclimate systems, and improve working conditions. In addition, the reliability of the assessment of occupational risks for service personnel increases, which is an important factor in ensuring industrial safety and reliability.*

***Keywords: technological equipment, harmful substances, air exchange, microclimate of industrial buildings.***