

КОНСТРУКТИВНІ ПАРАМЕТРИ ФОРСУНОК ЗІ СПІВУДАРНИМИ СТРУМЕНЯМИ ДЛЯ МОКРОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ

Кожемякін Г.Б.

Запорізький національний університет
вул. Університетська, 66, 69011, м. Запоріжжя
kgb04@ukr.net

При очищенні газів промислових виробництв, які викидаються в атмосферу перевага надається системам очищення газів, які є простими у виготовленні та експлуатації, а їхня робота не вимагає великих енерговитрат. Водночас вони не повинні потребувати значних капітальних вкладень. Сучасне газоочисне обладнання не завжди відповідає цим вимогам. Згідно з цим, для очищення низьконапірних газових потоків найдоцільніше зазвичай використовувати частину газоходу природної витяжки як газоочисний апарат. Найбільше відповідають вимогам та умовам експлуатації установки мокрого очищення газу, де газовий потік обробляється плоскими водяними струменями. Вони є компактними, мають низький гідравлічний опір. Однак, ці апарати мають певні недоліки: недостатній ступінь очищення газів, нерівномірне зрошення газового потоку, неможливість використання на оборотній рідині, що містить шлам, через абразивний знос диспергуючих елементів, а також високе споживання зрошуючої рідини. З метою зменшення витрат рідини на очищення, диспергуючі пристрої зазвичай працюють на оборотній рідині, яка містить шлам. Це, у свою чергу, спричиняє їхнє інтенсивне абразивне зношування. Зменшити знос можна, використовуючи метод диспергування рідини за допомогою співударних струменів. Існуючі конструкції форсунок зі співударними струменями забезпечують достатній рівень диспергування рідини, рівномірне зрошення газового потоку та формування плоского факела розпилу. Розглянуто основні конструктивні параметри форсунок зі співударними струменями для створення полого конічного факелу диспергованої рідини при застосуванні їх в мокрій очистці газів. Досліджено вплив геометричних параметрів форсунок на кут розкриття полого конічного факелу розпиленої рідини. Отримана математична модель взаємозв'язку кута розкриття полого конічного факелу розпиленої рідини з конструктивними характеристиками сопел форсунки. *Ключові слова:* низьконапірний газовий потік, мокре очищення газів, форсунка зі співударними струменями, полий конічний факел розпиленої рідини, конструктивні параметри форсунок.

Design parameters of nozzles with impact jets for wet gas purification. Kozhemiakin G.

When cleaning industrial gases emitted into the atmosphere, preference is given to gas cleaning systems that are simple to manufacture and operate, and their operation does not require large energy costs. At the same time, they should not require significant capital investments. Modern gas cleaning equipment does not always meet these requirements. Accordingly, for cleaning low-pressure gas flows, it is usually most expedient to use a part of the natural exhaust gas duct as a gas cleaning device. The wet gas cleaning unit, where the gas flow is treated with flat water jets, best meets the requirements and operating conditions. They are compact and have low hydraulic resistance. However, these devices have certain disadvantages: insufficient degree of gas cleaning, uneven irrigation of the gas flow, inability to use on a circulating fluid containing sludge due to abrasive wear of the dispersing elements, as well as high consumption of the irrigation fluid. In order to reduce the consumption of liquid for cleaning, dispersing devices usually operate on a circulating liquid containing sludge. This, in turn, causes their intensive abrasive wear. Wear can be reduced by using the method of dispersing liquid using co-impact jets. Existing designs of nozzles with co-impact jets provide a sufficient level of liquid dispersion, uniform irrigation of the gas flow and the formation of a flat spray flame. The main design parameters of nozzles with co-impact jets for creating a hollow conical spray flame of dispersed liquid when used in wet gas cleaning are considered. The influence of the geometric parameters of the nozzles on the opening angle of the hollow conical spray flame of the sprayed liquid is investigated. A mathematical model of the relationship between the opening angle of the hollow conical spray flame of the sprayed liquid and the design characteristics of the nozzle nozzles is obtained. *Key words:* low-pressure gas flow, wet gas cleaning, impingement jet nozzle, hollow conical spray nozzle, nozzle design parameters.

Актуальність дослідження. Несприятливий екологічний стан атмосфери у багатьох промислових центрах України потребує оснащення джерел викидів шкідливих речовин високоефективними газоочисними апаратами, оскільки можливості суто технологічних заходів, що забезпечують скорочення викидів безпосередньо від технологічних агрегатів, в багатьох випадках, або вичерпані або обмежені.

Значна частина шкідливих речовин викидаються в атмосферу з низьконапірними газовими потоками. Кількість таких газів може досягати до 25% загального обсягу промислових газоподібних викидів в атмосферу. Але через досить високий гідравліч-

ний опір більшості газоочисних апаратів (до 1000 Па і більше) вони неприйнятні для таких умов або вимагають установки додаткового тягодуттєвого обладнання, що не завжди можливе через дефіцит виробничих площ.

Виходячи з цього, для очищення низьконапірних газових потоків як газоочисних апаратів найбільше доцільно, як правило, використовувати частину газоходу природної витяжки.

Постановка проблеми. Найбільш повно відповідають зазначеним вище вимогам та умовам експлуатації апарати мокрого очищення газу [1], в яких газовий потік перекривається плоскими водяними

струменями. Вони компактні, мають низький гідравлічний опір. Однак мають ряд недоліків, а саме: не завжди достатній ступінь очищення газів, нерівномірність зрошення газового потоку, неможливість експлуатації на оборотній рідині, що містить шлам, через абразивний знос диспергуючих пристроїв, велика витрата зрошуючої рідини

Одним з основних вузлів в апаратах мокрого очищення газів є форсунки для розпилювання рідини. Для досягнення найбільшої ефективності очищення їх конструкція повинна забезпечувати достатню ступінь диспергування рідини і рівномірність зрошення газового потоку.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. В процесі створення засобів для мокрого очищення газових потоків, що відповідають сучасним вимогам, була розроблена форсунка зі співударними струменями [2]. Вона дозволила отримати порожнистий конічний факел розпиленої рідини, який має хороші перспективи для створення високоефективних газоочисних апаратів із зменшеним краплевиносом. Перевагою розробленої форсунки, як показали наступні її випробування і результати експлуатації в промислових умовах, є простота виготовлення і використання, стійкість до абразивного зносу, можливість отримання кута розкриття в межах від 30° до 180°.

Постановка проблеми. Отримати порожнистий конічний факел розпиленої рідини, представляється можливим, як показали попередні дослідження, при використанні у форсунці сопел з отворами різного діаметру. Причому, діаметр отвору верхнього сопла не має бути менше діаметру нижнього сопла і, крім того, вихідний отвір верхнього сопла може бути виконаний з розточуванням. Для забезпечення ефективних режимів експлуатації апаратів було необхідно визначити оптимальні геометричні параметри форсунок. Для цього проведені дослідження для визначення залежності кута розкриття порожнистого факела рідини, що розпилювалася, від геометричних параметрів форсунки зі співударними струменями.

Виклад основного матеріалу. Схема процесу зіткнення струменів рідини в форсунці зі співударними зображена на рис. 1.

Імпульс маси рідини, що витікає з верхнього отвору, – $m_1 v_1$, а з нижнього – $m_2 v_2$. При розширенні діаметру отвору верхнього насадка розточуванням під кутом ϕ діаметр кінця отвору складе:

$$d_1' = d_1 + 2l \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (1)$$

При цьому швидкість на виході з отвору:

$$v_1 = \frac{v}{1 + 2 \frac{l}{d_1} \operatorname{tg}\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (2)$$

Різниця кількості руху мас співударних струменів:

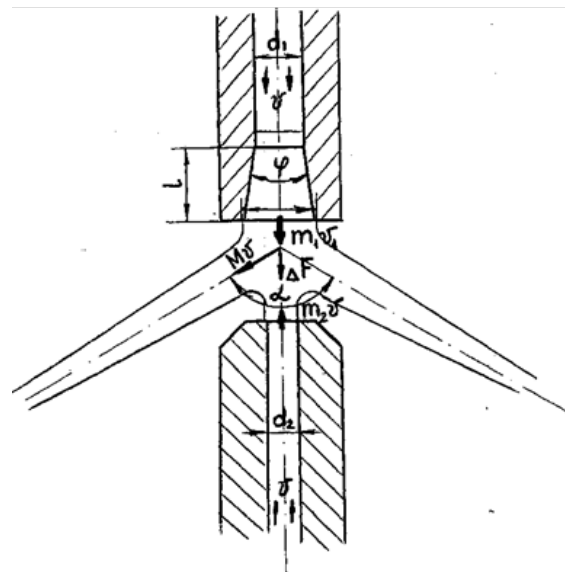


Рис. 1. Схема процесу зіткнення струменів рідини

$$\Delta F = m_1 v_1 - m_2 v_2 = \rho v^2 \left[\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 - d_2^2 \right] \quad (3)$$

Згідно із законом збереження імпульсів :

$$\Delta F = Mv \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4)$$

Прирівнюємо вирази (2.3) і (2.4) :

$$\rho v^2 \left[\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 - d_2^2 \right] = Mv \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (5)$$

Виразення для кількості руху рідини, що розтікається, :

$$Mv = \rho v^2 \left[\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 + d_2^2 \right] \quad (6)$$

Підставляємо виразення (6) в (5) :

$$\rho v^2 \left[\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 - d_2^2 \right] = \rho v^2 \left[\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 + d_2^2 \right] \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (7)$$

Перетворюючи, отримуємо:

$$\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 - d_2^2}{\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 + d_2^2} \quad (8)$$

Виразення для кута розкриття факелу:

$$\alpha = 2 \arccos \frac{\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 - d_2^2}{\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 + d_2^2} \quad (9)$$

Якщо розточування відсутнє, вираження (9) набирає вигляду:

$$\alpha = 2 \arccos \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_1^2 + d_2^2} \quad (10)$$

Лабораторні дослідження проводилися на експериментальній установці, зображеній на рис. 2.

При зіткненні струменів утворюється порожнистий конічний факел розпиленої рідини 7, який перекриває переріз бака. Бак виконаний з оргскла. Кут розкриття факела визначався за допомогою транспортиру, нанесеного на стінку бака. Зрошувальна рідина подавалась по трубопроводу 1, тиск і витрата якої визначались по манометрах 4 і витратомірах 5 і регулювалися вентилями. Діаметри сопел 2, 3 змінювалися в межах 3-14 мм, розточування виконувалося під кутом 0-35°.

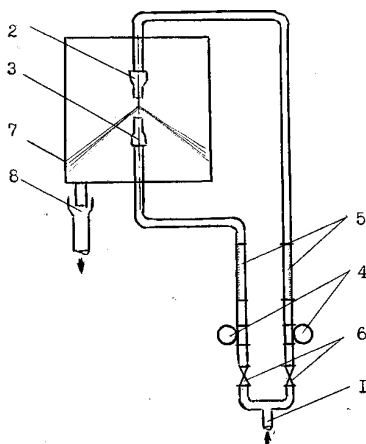


Рис. 2. Експериментальна установка для дослідження залежності кута розкриття факела від геометричних параметрів форсунки

Конструкція форсунки для проведення досліджень представлена на рис. 3.

Результати досліджень в графічному виді представлені на рис. 4.

Справедливість залежності (9), що отримана теоретично, перевірена з використанням експериментальних даних [3]. Результати перевірки показали адекватність математичної моделі експериментальним даним. Теоретичні розрахунки співпадають з даними досліджень зі ступенем вірогідності $\alpha=0.9$. Максимальне середньоквадратичне відхилення $\sigma=4.7$. Погрішність не перевищує 7 %.

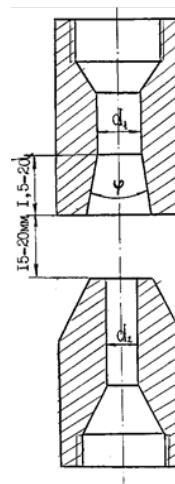


Рис. 3. Форсунка з співударними струменями

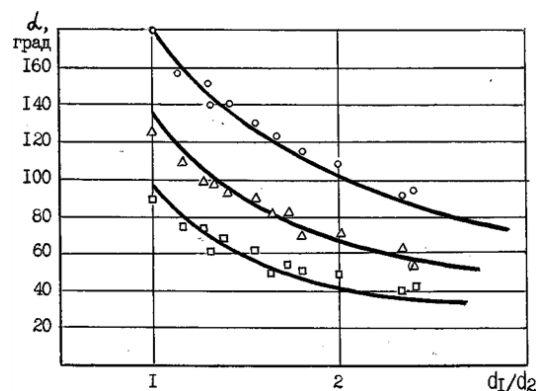


Рис. 4. Залежність кута розкриття факела розпиленої рідини від співвідношення діаметрів сопел при куті розточування ϕ : $\circ$ – 0о; Δ – 15о; $\square$ – 30о

Висновки. В результаті проведених досліджень визначені оптимальні параметри форсунки. Так відношення діаметрів отворів сопел повинне знаходитися в межах 1–3. При збільшенні цього відношення відбувається руйнування стійкого факела розпиленої рідини. Кут розточування не повинен перевищувати 30°. При більшому куті розточування відбувається відрив струменя від стінки у верхньому соплі і порушується стійкість факела. Глибина розточування знаходиться в межах 1,5–2 d. При меншій глибині струмінь рідини не устигає стабілізуватися після розширення, а при більшій точка розкриття факела знаходиться поблизу верхнього сопла і факел руйнується об його стінки.

Література

1. S. Mukherjee, H. Siddiqi, P. Maiti, P. Parmar, B.C. Meikap. A comprehensive analysis of removal of hazardous dust particulates from chemical and process industries off gases by advanced wet scrubbing techniques – A review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Amsterdam: Elsevier, 2024. Volume 91. A. 105406.
2. Розпилювач: заявка на пат. Україна 95062927 МПК В05В3/02; заявл. 21.06.1995; опубл. 30.04.1998, Бюл. № 2.
3. Чисельні методи: Навчальний посібник. / Волонтир Л.О., Зелінська О.В., Потапова Н.А., Чіков І.А., Вінницький національний аграрний університет. – Вінниця: ВНАУ, 2020 – 322 с.