

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ПИЛОГАЗООЧИСНОГО ОБЛАДНАННЯ З РЕГУЛЯРНОЮ ПУЛЬСАЦІЙНОЮ НАСАДКОЮ

Робота присвячена дослідженню гідродинаміки вискоелективного обладнання для комплексного очищення пилогазових викидів. Одним із шляхів зниження кількості пилогазових викидів є підвищення ефективності газоочисного устаткування. Розглянуті конструкції апаратів для очищення газів, що відходять, працюють в режимі розвиненої турбулентності. Апарати з регулярною пульсаційною насадкою характеризуються високою ефективністю уловлювання різних по дисперсності твердих частинок, здатністю до самоочищення контактних елементів від пилу, низької матеріаломісткістю і високою надійністю в експлуатації. Основною метою дослідження є фізичний опис конструкцій та дослідження гідродинамічних режимів роботи апаратів для комплексного очищення пилогазових викидів промислових підприємств. Поставлена мета досягається за допомогою опису конструкцій та фізичної картини взаємодії газової та рідкої фаз в об'ємі досліджуваних апаратів, встановлення основних гідродинамічних режимів роботи та оптимальних робочих діапазонів роботи обладнання за швидкістю газу. Регулярне розташування елементів насадки на струні дозволяє організувати вихрові зони із певним встановленим кроком як у поздовжньому так і поперечному перетині, що забезпечує рівномірний розподіл потоків і однорідність газорідного шару. У ежекційному і форсунковому варіанті апаратів з регулярною пульсаційною насадкою можна чітко виділити три гідродинамічні режими: протиточний, перехідний і прямоточний. Робочим режимом є прямоточний. Дослідження апаратів із регулярною пульсаційною насадкою дозволяють говорити про можливість їх використання для комплексного очищення пилогазових викидів підприємств з метою зниження негативного впливу на довкілля.

**Ключові слова:** пилогазоочисне обладнання, дослідження режимів роботи, гідравлічний опір, зона ежекції, утворення вихорів, дрібнодисперсні зважені речовини.

**Постановка проблеми.** Важливим питанням сьогодення є екологічні проблеми атмосфери, що забруднюється викидами газу з дрібнодисперсними зваженими речовинами, на різноманітних промислових об'єктах [1]. Осадження забруднюючих речовин з газових викидів промислових підприємств призводить до забруднення ґрунту і міграції важких металів в підземні і поверхневі води.

Це ставить завдання розробки природоохоронних заходів з охорони атмосферного повітря від різноманітних за складом і фізико-хімічними властивостями викидів промислових підприємств. Одним із шляхів зниження кількості пилогазових викидів є підвищення ефективності газоочисного устаткування. Вибір газоочисного устаткування повинен враховувати цілий ряд факторів: фізико-хімічні характеристики газу-носія, характеристики хімічних і твердих забруднюючих речовин [2]. Комплексне очищення газів від газоподібних речовин і твердих частинок вимагає застосування багатоступеневих систем очищення, що, як правило, збільшує капітальні та експлуатаційні витрати і не завжди забезпечує необхідний результат.

Тому задача підбору вискоелективного і надійного обладнання, здатного вловлювати дрібнодисперсний пил, є достатньо актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасний розвиток виробництва і технології супроводжується надходженням у навколишнє середовище великої кількості різноманітних аерозольних систем (туман, дим, дрібний пил тощо) [3, 4]. Існуючий викид аерозолів у навколишнє середовище характеризується тривалим терміном експлуатації, демонструє високий ступінь забруднення та поширення на великі відстані, що свідчить про значні регіональні та глобальні аспекти впливу на навколишнє середовище [5].

Звичайне обладнання для видалення твердих часток (електрофільтри, циклони та інші) не дуже ефективне для дрібнодисперсних частинок з розмірами менше мікрону [6-8]. Одним із шляхів інтенсифікації інерційно-дифузійних процесів осадження, що становлять основу технології «мокрого» очищення газів від аерозолів (туману, пилу, диму та інші), є проведення цих процесів в

інтенсивних режимах розвинутої турбулентності [9-12]. Їх реалізація можлива в апаратах з регулярною пульсаційною насадкою (РПН).

Апарати з РПН характеризуються високою ефективністю вловлювання різних по дисперсності аерозолів, здатністю до самоочищення контактних елементів від різних злипливих включень, низькою матеріаломісткістю та високою надійністю в експлуатації [13], що робить їх досить перспективними у широкому промисловому використанні.

**Постановка завдання.** Можливість керованого впливу на структуру турбулентного потоку найбільш повно реалізовано в апаратах з РПН. Розвинута зона контакту пилогазового потоку з краплями і плівками рідини в апаратах з РПН може бути організована за рахунок введення у робочий об'єм додаткових закріплених або незакріплених насадкових тіл. Регулярне розташування елементів насадки на струні дозволяє організувати вихрові зони із певним встановленим кроком як у повздовжньому так і поперечному перетині, що забезпечує рівномірний розподіл потоків і однорідність газорідного шару.

Метою роботи є дослідження гідродинаміки високоефективного пилогазоочисного обладнання з РПН на базі дослідних конструкцій апаратів з організованими вихровими зонами.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені наступні завдання:

1. Провести опис конструкцій і фізичну картину взаємодії газової і рідкої фаз в об'ємі досліджуваних апаратів.

2. На підставі експериментальних досліджень встановити основні гідродинамічні режими роботи обладнання.

3. Встановити оптимальні робочі діапазони роботи обладнання за швидкістю газу.

**Виклад основного матеріалу.** Внаслідок лабораторних досліджень було запропоновано конструкції апаратів з РПН, що поєднують у собі можливості створення у робочій зоні організованих вихрових зон і мають широкий діапазон стійкої роботи. Для опису гідродинаміки апаратів з РПН було використано лабораторні стенди (рис. 1), що становлять собою прямокутні апарати колонного типу з регулярним розташуванням турбулізуючих елементів, що відповідає принципам поздовжнього секціонування та призначені для очищення газів від дрібнодисперсних зважених речовин.

Одна із дослідних конструкцій ежекційного апарату з РПН (рис. 1,а) становить собою колонний апарат усередині якого між двома опорними решітками закріплені гнучкі струни на яких зафіксовано елементи насадки (пластини). Під дією газового потоку відбувається коливальний рух струн. Це забезпечує турбулізацію газорідного шару, а повздовжні коливання сприяють збільшенню перемішування потоків. Керований вплив на газовий потік здійснюється за рахунок зміни геометричних форм, розмірів і кроком розташування турбулізуючих елементів на струнах. Кріплення струн до опорних решіток може бути жорстким і консольним.

Відсутність форсунок для зрошення, великий вільний перетин опорних решіток ( $S_o \geq 0,9 \text{ м}^2/\text{м}^2$ ), великий вільний об'єм апарату ( $\mathcal{E}_o = 0,9 - 0,98 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) і коливання насадки дозволяють використовувати апарат для очищення сильно забруднених газових потоків, які містять дрібнодисперсні зважені або смолисті речовини, а також необхідності отримання висококонцентрованих розчинів. Такі конструктивні рішення становлять важливе значення для низки технологічних схем підприємств хімічної галузі (особливо мінеральних добрив) і дозволяють суттєво розширити напрями використання мокрих пиловловлювачів.

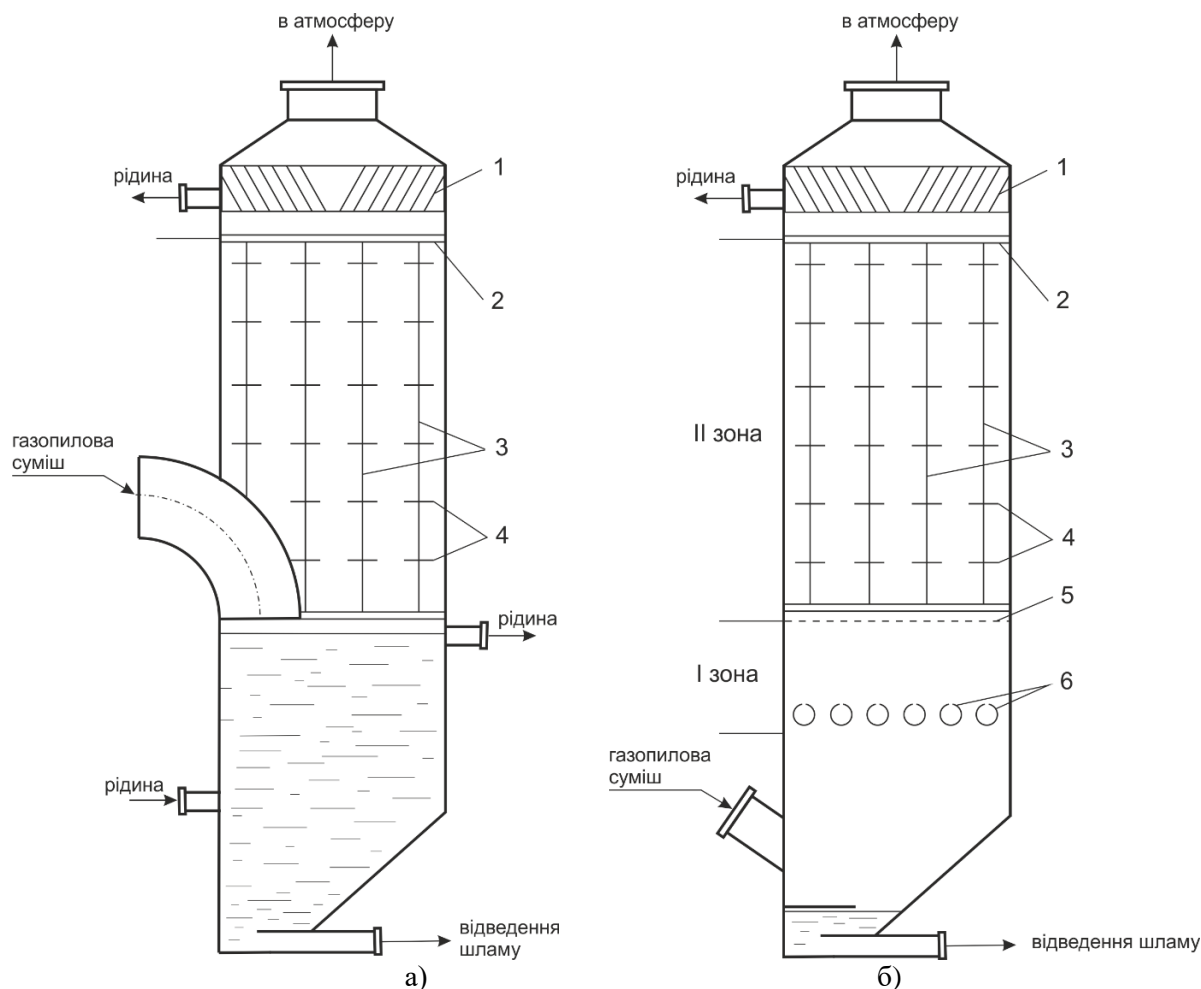
Дослідні апарати з РПН обладнанні конічним відцентровим вихроутворювачем, який забезпечує високу ефективність відокремлення рідини від газового потоку у широкому діапазоні навантажень за рідиною і газом.

З метою очищення великих об'ємів газу, до 200 тис.  $\text{м}^3/\text{год}$ , зі значною зміною продуктивності і невисокими концентраціями зважених речовин у зрошувальній рідині також розроблено конструкція форсунокового апарату з РПН (рис. 1, б). Парорідинна суміш подається за схемою висхідного прямогоку через отвори циліндричних труб у нижній частині апарату.

Контактна зона апарату складається із двох послідовно з'єднаних зон обробки газів.

У першій зоні відбувається укрупнення зважених у газовому потоці аерозольних частинок за рахунок конденсаційно-коагуляційного механізму осадження. Зона складається з пакета плоскопаралельних каналів з рівномірно розташованими в них турбулізуючими елементами, виконаними у вигляді порожнистих циліндрів. Циліндри в нижній частині мають перфорацію і одночасно виконують функцію парових каналів (подається парорідинна суміш). Провальна

тарілка, яка розділяє зони апарату, має діаметр отворів  $d_0=20$  мм і вільний переріз полотна тарілки 45%, що створює рівномірний пилогазорідинний потік у другій зоні апарату.



**Рис. 1. Схема досліджуваного прямооточного апарату ежекційного (а) та форсункового (б) типу з регулярним розташуванням турбулізуючих елементів:**

1 – відцентровий краплевловлювач; 2 – фіксуєча решітка; 3 – струни; 4 – пластини; 5 – розподільча решітка (провальна тарілка); 6 – циліндри з форсунками для введення парорідинної суміші

Друга зона, що призначена для уловлювання дрібнодисперсних зважених речовин, є шаром насадки у вигляді регулярно розташованих по перерізу струн з рівномірно закріпленими на них пластини. У поздовжньому перерізі пластини на струні можуть мати шахове або коридорне розташування (в останньому випадку вони утворюють «гіпотетичну» тарілку).

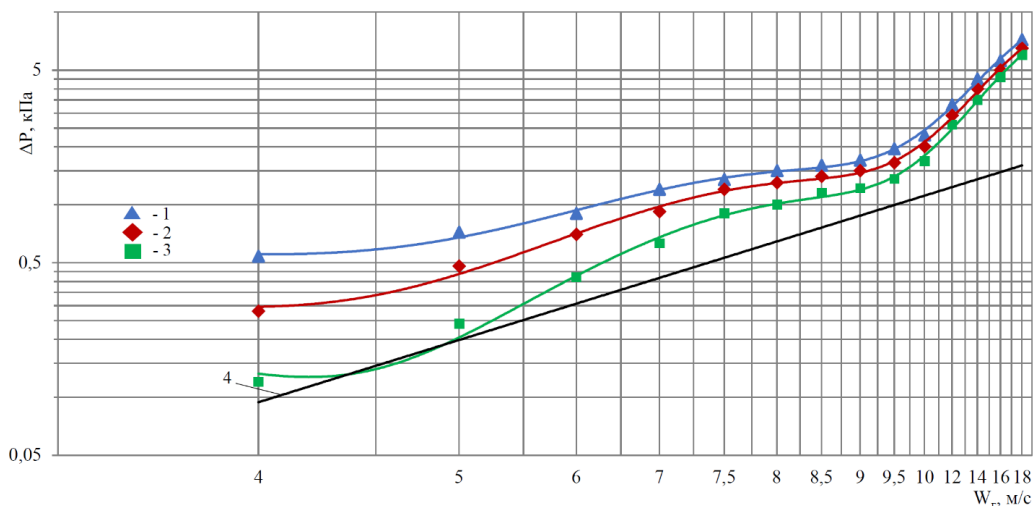
Для проведення досліджень було створено установки з вищезазначеними типами апаратів з РПН розміром  $1500 \times 400 \times 300$  мм. У якості насадкових елементів використовувались пластини квадратної форми  $30 \times 30$ ,  $50 \times 50$ ,  $80 \times 80$  мм і круглої форми діаметром  $\varnothing 30$ ,  $50$ ,  $80$  мм.

Вимірювання товщини плівки і розміру крапель відбувалося з використанням методу лазерного ножа і швидкісної фото-, відеозйомки. Фракційна ефективність апаратів визначалась малогабаритним семиступеневим імпактором із подвоєними ступенями, що був тарований монодисперсним аерозолем.

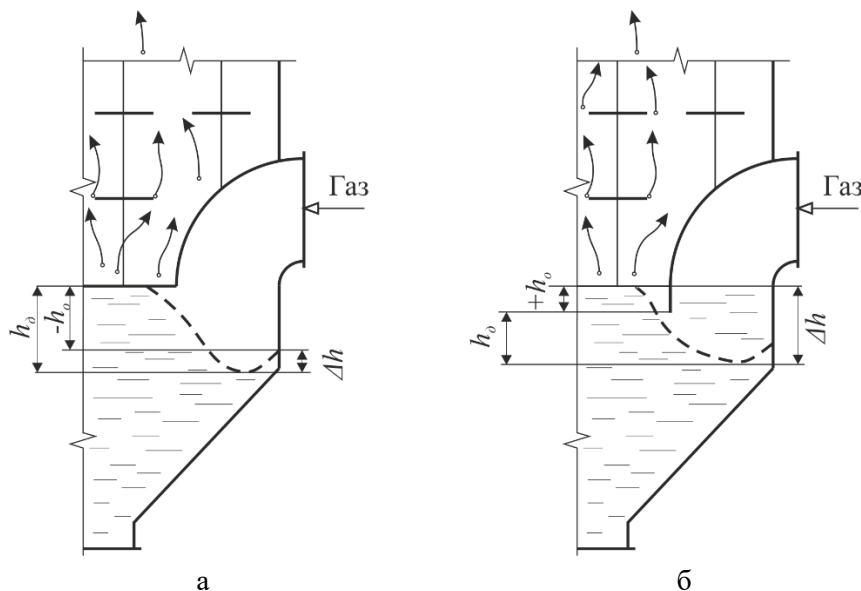
*Ежекційний варіант апарата з РПН.* Аналіз зміни гідравлічного опору апарата від швидкості газу за різних початкових рівнях рідини, а також візуальні спостереження і відеозйомка дозволяють виділити три гідродинамічних режими: протиточний, перехідний і прямооточний (рис. 2).

За режиму протитоку ( $W_s < 7$  м/с) в результаті удару газового потоку під патрубком спостерігається (рис. 3) утворення кратера, а відтиснена рідина піднімається у зону ежекції, де у результаті тертя з поверхні «пагорба» відбувається зрив і винесення крапель у контактну зону апарата. Кількість рідини, що намагається відокремитися від поверхні у вигляді струменів,

залежить від швидкості газу в зоні ежекції і значною мірою від початкового рівня рідини. Величина  $h_o$  у цьому режимі визначає як характер зміни  $\Delta P$ , так і структуру газорідного шару. За  $h_o < 0$  вплив  $W_2$  на  $\Delta P$  більший, ніж за умови  $h_o > 0$ , а у розмірах крапель, що відриваються від поверхні рідини, переважають більш тонкодисперсні фракції (0,8–1,2 мм). Останні осаджуються на елементах насадки (пластинах) у контактній зоні апарату, що утворює плівку рідини, яка з часом накопичення стікає з них і руйнується. Краплі, що генеруються елементами насадки, за цього режиму мають більший фракційний розмір (1,4–2,1 мм), швидкість витання яких більша за швидкість газу в перетині апарату. Саме це й призводить до протитечійного руху і випадіння крапель у зону ежекції. Крім того, частина рідини стікає у вигляді плівок стінками апарату і струнах на яких закріплено насадку.



**Рис. 2.** Залежність гідравлічного опору ежекційного апарату з РПН від швидкості газу за умови різного початкового рівня рідини: 1 –  $h_o = +0,03$  м; 2 –  $h_o = 0$  м; 3 –  $h_o = -0,03$  м; 4 – без рідини



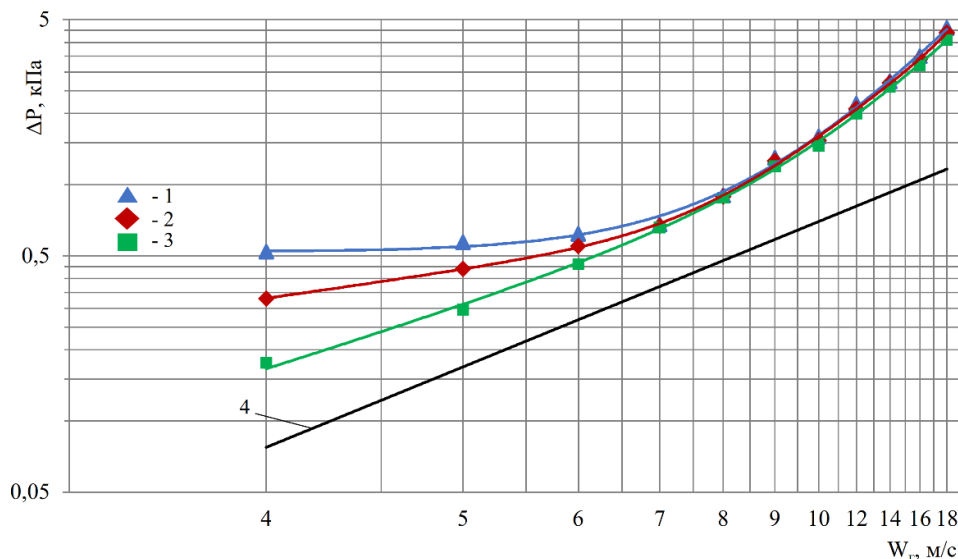
**Рис. 3.** Взаємодія фаз в ежекційній зоні: а –  $h_o < 0$ ; б –  $h_o > 0$

За  $h_o > 0$  вплив  $W_2$  на  $\Delta P$ , як вже було зазначено, дещо нижчий, а розмір крапель, що відриваються від поверхні рідини більший ніж 2,5 мм. Очевидно, що загальна кількість рідини, що знаходиться у контактній зоні, за позитивних значень початкового рівня вище ніж за негативних, що і визначає великі значення гідравлічного опору апарату.

У зв'язку із значним впливом на характеристики і структуру газорідного шару ежекційної зони розглянемо вплив  $W_2$  і  $h_o$  на її гідравлічний опір (рис. 4).

Коефіцієнт опору сухого апарату у цій зоні визначено як  $\zeta_n = 0,91$ , що відповідає величині коефіцієнта опору для коліна або відвідного патрубку. Наявність рідини в середині апарату

призводить до підвищення гідравлічного опору на величину, що визначається коефіцієнтом опору зони ежекції і величиною зміни рівня рідини  $\Delta h$  (рис. 3). При цьому, відповідно до рис. 4 величина  $\Delta P_e$  за умови швидкості газу в апараті  $W_2 > 7$  м/с (швидкість у зоні ежекції  $W_e > 10,5$  м/с) практично мало залежить від значення початкового рівня рідини в апараті, а визначається переважно  $W_2$ . За  $W_2 < 7$  м/с залежність  $\Delta P_e$  від  $h_o$  має складний характер. Для  $h_o < 0$  гідравлічний опір витрачається здебільшого на підйом рідини в зону ежекції і її подрібнення, а за умови  $h_o > 0$  витрати енергії витрачаються переважно на подрібнення плівок рідини на краплі.



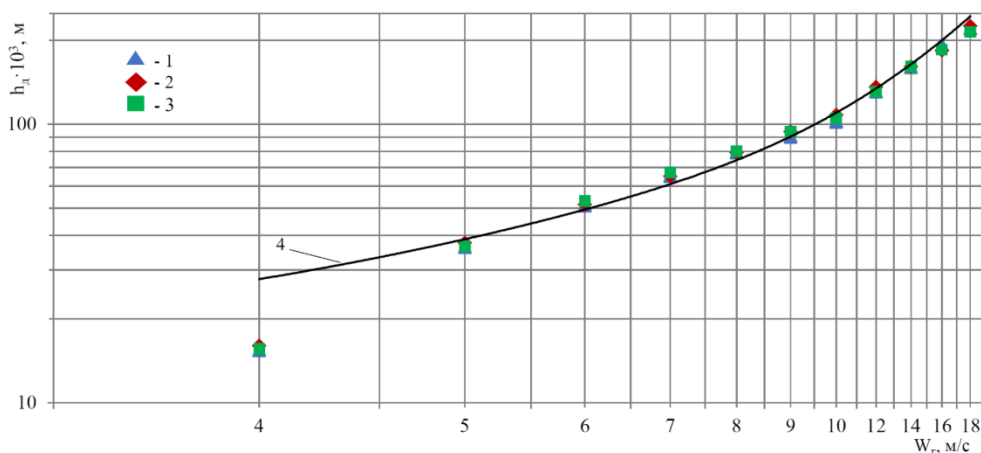
**Рис. 4.** Залежність гідравлічного опору зони ежекції від швидкості газу за умови різного початкового рівня рідини: 1 –  $h_o = +0,03$  м; 2 –  $h_o = 0$  м; 3 –  $h_o = -0,03$  м; 4 – без рідини

Із зазначеного вище випливає, що величина гідравлічного опору зони ежекції визначається кількістю рідини, що витискується у контактну зону  $\Delta h$  і дорівнює

$$\Delta h = h_o + h_d, \quad (1)$$

де  $h_d$  – дійсна відстань рівня рідини (динамічний рівень рідини) від нижнього краю патрубку, м.

Експериментальні дані вказують (рис. 5) на те, що значення  $h_d$  не залежать від початкового рівня і визначаються швидкісним напором газового потоку, що витікає із патрубка. За зазначеного протиточного режиму і величиною  $h_o > -0,03$  м значення  $h_d$  виявляються меншими ніж величина зазору  $h_o$ , що призводить до виходу газового потоку через зазор майже без взаємодії з рідиною, на що укаже і характер зміни  $\Delta P_e$ .



**Рис. 5.** Залежність динамічного рівня рідини від швидкості газу за різних початкових рівнях рідини: 1 –  $h_o = +0,03$  м; 2 –  $h_o = 0$  м; 3 –  $h_o = -0,03$  м; 4 – розрахунок за рівнянням (2)

Потрібно відмітити, що в режимі протитоку величина  $h_d$  більш сильно залежить від  $W_2$  на відміну від режиму прямогоку.

Оскільки, як було зазначено вище, значення динамічного рівня рідини визначається напором газового потоку, для  $h_0$  можна записати

$$h_0 = \zeta_e \frac{W_n^2}{2g}, \quad (2)$$

де  $\zeta_e$  – коефіцієнт опору зони ежекції;  $W_n$  – швидкість газового потоку у перерізі патрубку.

У результаті обробки експериментальних даних було отримано значення коефіцієнта опору зони ежекції і яке можна визначити наступною залежністю

$$\zeta_e = \frac{1,215}{Re^{0,55}}, \quad (3)$$

де  $Re = \frac{W_n \cdot d_e}{\nu_2}$  – число Рейнольдса;  $d_e$  – еквівалентний діаметр вхідного патрубку, м;  $\nu_2$  – в'язкість газу, м<sup>2</sup>/с.

Результати розрахунків  $h_0$  наведено на рис. 5. Відносна похибка рівняння (2) у діапазоні  $Re = 3,65 \cdot 10^4 - 40 \cdot 10^6$  ( $W_2 = 4-18$  м/с,  $\Gamma = W_n/W_2 = 3$ ) не перевищує  $\pm 11,5\%$  і лише за  $W_2 = 4$  м/с сягає  $+34\%$ . Для значень числа Рейнольдса більше ніж  $40 \cdot 10^6$  значення коефіцієнта  $\zeta_e$  буде більшим.

Перехідний режим  $7 < W_2 < 9,5$  м/с буде характеризуватися зниженням залежності перепаду тиску від швидкості газу. Нестійка рівновага між силою опору середовища і силою тяжіння рідини, що утримується, спричинює коливання і пульсації у шарі регулярної рухомої насадки, а також призводить до коливань рівня рідини у обсязі апарату. Важливо зауважити, що для швидкості  $W_2 = 7-8$  м/с практично дуже складно виміряти значення  $h_0$  через значні коливання шару рідини. Під час перехідного режиму почергово можна спостерігати або висхідний рух рідини угору вздовж контактної зони або ж після накопичення рідини на поверхні насадки зрив плівок рідини, їх подрібнення і провал рідини у зону ежекції. Межі діапазону цього режиму залежать від конструктивних параметрів контактної зони – величини горизонтального і вертикального кроку між елементами насадки, геометричної форми насадки і її розмірів. Кількість утримуваної рідини, особливо на верхній межі режиму несуттєво залежить від початкового рівня рідини в апараті. Наявність перехідного режиму спричинено з елементами насадки, затримкою рідини на їх поверхні із подальшим накопиченням і зливом плівок рідини. Ежекційна зона (рис. 4) не має характерних змін у цьому діапазоні швидкостей, тобто швидкості в зоні ежекції  $W_e > 10,5$  м/с достатньо для транспортування рідини газовим потоком.

Режим прямого, який починається за  $W_2 > 8,5-9,5$  м/с залежно від початкового рівня рідини, характеризується повним транспортом рідкої фази із об'єму апарату у відцентровий краплевловлювач. Пульсації  $\Delta P$  завершуються, а величина динамічного рівня рідини стабілізується. Таким чином, у режимі прямого величина швидкісного тиску є достатньою незалежно від величини  $h_0$  для підняття максимально можливої кількості рідини з поверхні «пагорба» рідини, тому гідравлічний опір і визначається переважно витратами на транспортування рідини. Елементи насадки, на яких осаджуються краплини рідини, з часом накопичення рідини, виконують функцію генераторів крапель цілком визначеного розміру. При цьому, на відміну від протиточного режиму, швидкість витання новоутворених крапель рідини нижча за швидкість газу в апараті і вони транспортуються газовим потоком угору, до моменту зіткнення з наступним елементом насадки, де знову повторюється процес накопичення рідини, зриву і наступного дроблення.

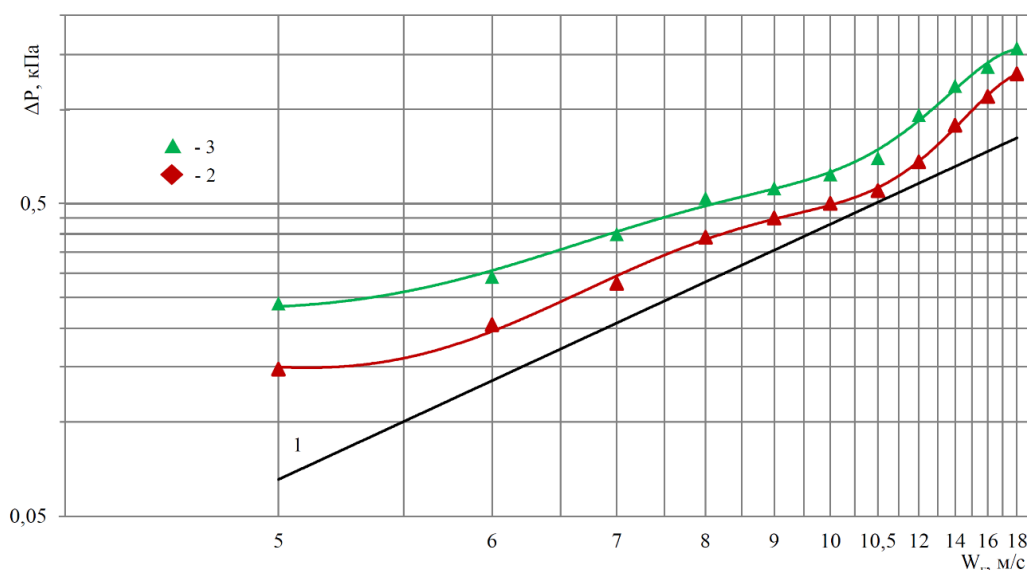
Величина гідравлічного опору ежекційного апарату з РПН, а також межі переходу від одного режиму до іншого визначаються також співвідношенням  $W_n/W_2 = \Gamma$ . За умови, коли  $\Gamma = 3$  і  $h_0 = 0$  м, гідравлічний опір зони ежекції сягає  $\Delta P_e = 2640$  Па ( $W_2 = 10$  м/с), при цьому перехід до прямого режиму спостерігається за  $W_2 = 6$  м/с. Зменшення співвідношення  $\Gamma = 3$  призводить до зниження  $\Delta P_e$  до 2080 Па ( $W_2 = 10$  м/с) і підвищенню швидкості переходу до режиму прямого при  $W_2 = 7,5$  м/с. Подальше зниження співвідношення  $\Gamma = 2$  підвищує швидкість переходу до режиму прямого при  $W_2 = 9-9,5$  м/с, однак за таких швидкостей винесення рідини у зону ежекції відбувається менш інтенсивно, погіршується взаємодія фаз газ – рідина. Тому, оптимальним значенням співвідношення  $W_n/W_2$  варто прийняти величину, що дорівнює 3.

Таким чином, аналіз гідродинамічної картини для ежекційного апарату з РПН дозволяє стверджувати щодо можливості високоефективного перебігу процесів пиловловлення і масообміну за розвинутого прямого режиму взаємодії фаз, при цьому верхнє значення

швидкості пилогазового потоку може бути обмежене величиною не більше 12 м/с, оскільки за  $W_2 > 12$  м/с можна спостерігати значне зростання гідравлічного опору апарата.

**Форсунковий апарат з РПН.** Гідродинаміка подібної конструкції апарату детально розглянута і узагальнено основні принципи функціонування у роботі [13]. Тому, дослідження проводились, в основному, за оптимальних конструктивних параметрів і низької питомої витрати паро- газорідинної суміші (до 1,5 л/м<sup>3</sup>), що відповідає процесам пиловловлення, і об'ємі, необхідному для коректного співставлення з ежекційним варіантом апарата з РПН.

У форсунковому варіанті апарату з РПН також можна чітко виділити три гідродинамічні режими: протиточний, перехідний і прямоточний (рис. 6). На відміну від ежекційного варіанту тут більш чітко виражено перехідний режим і в залежності від величини питомого зрошення  $m$  його діапазон коливається в межах від 7,5 до 10,5 м/с. Причина цьому – наявність розподільної решітки – тарілки з великими отворами (вільний перетин складає більше 50%) перед контактною зоною апарату. Накопичення рідини на решітці і відповідно кількості утримуваної рідини у контактній зоні апарату призводить до нестійкого руху фаз. Можна спостерігати почергове провалювання рідини і її накопичення.



**Рис. 6.** Залежність гідравлічного опору форсункового апарату з РПН від швидкості газу за різної щільності зрошення: 1 –  $m = 0$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; 2 –  $m = 0,5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; 3 –  $m = 1,5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

Лабораторні дослідження порівняння величини швидкості переходу від протиточного до перехідного режиму обох конструкцій апаратів дозволяють стверджувати, що швидкість є приблизно рівною і становить 7 – 8,5 м/с.

Гідравлічний опір в прямоточному режимі як і у ежекційному варіанті апарату з РПН змінюється за квадратичним законом. Однак у цілому опір форсункового варіанту апарата в режимі прямотоку у 3,4–3,7 рази нижчий, ніж в ежекційному варіанті. Це можна пояснити значними витратами енергії в ежекційному варіанті на власне ежекцію рідини, а також великою втратою швидкісного тиску в зоні ежекції, оскільки  $W_n = 3 \cdot W_2$ , для форсункового варіанту максимальна швидкість газу у вхідному патрубку  $W_n = W_2$ , а в отворах розподільної решітки –  $W_0 \approx 2 \cdot W_2$ .

**Висновки.** Робочими режимами обох конструкцій апаратів є прямоточний, що забезпечує інтенсивну взаємодію фаз із дробленням та коагуляцією крапель рідини, тобто постійним оновленням поверхні осадження.

Рух дрібнодисперсних зважених частинок у газовому потоці після обтікання тіла відбувається з коливаннями та пульсаціями, які характерні для відривної течії несучого (газового) потоку. Крім того, під час руху полідисперсних зважених речовин в зоні одиничного вихору характерно перерозподіл фракцій дрібнодисперсних включень в обсязі вихору. Так, грубодисперсна фракція частинок, що має інерцію, прагне під дією відцентрових сил до периферії вихору, а безінерційна дрібнодисперсна фракція обертається в області осьової зони вихору.

Таким чином, вихровий перебіг потоку та його відривний (пульсаційний) характер руху значною мірою сприяє інтенсифікації процесів укрупнення та осадження частинок забруднюючих речовин.

#### Література

- 1 Leonard, R. L. Emission Reductions and Offsets // Air Quality Permitting. 2018. P. 81–91.
- 2 Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status quo, challenges and opportunities / Ahmad T. et all // Journal of Cleaner Production. 2021, Vol. 289, 125834.
- 3 Investigating the contribution of shipping emissions to atmospheric PM2.5 using a combined source apportionment approach / Lang J. L. et all // Environmental Pollution. 2017. Vol. 229. P. 557-566.
- 4 Impairment of soil health due to fly ash-fugitive dust deposition from coal-fired thermal power plants / R. Raja, A. K. Nayak, A. K. Shukla, K. S. Rao // Environmental Monitoring and Assessment. 2015. Vol. 187. P. 679.
- 5 Liao M. C., Lan K., Yao Y. Sustainability implications of artificial intelligence in the chemical industry: A conceptual framework // Journal of industrial ecology. 2021. Vol. 26(1). P. 164-182.
- 6 Sutherland K. Choosing equipment: Cleaning air and gas // Filtration & Separation. 2007. Vol. 44, №1, P. 16-19.
- 7 Hurets L. L., Kozii I. S., Miakaieva H. M. Directions of the environmental protection processes optimization at heat power engineering enterprises // Journal of Engineering Sciences. 2017. Vol. 4(2), P. G12-G16.
- 8 Kozii I. S., Plyatsuk L. D., Koval V. V. Algorithm for selection equipment to reduce the technogenic effect on the environment // Problemele Energeticii Regionale. 2022. Vol. 1(53). P. 59-67.
- 9 Xu Y. S., Liu X. W., Cui J. Field measurements on the emission and removal of PM2.5 from coal-fired power stations: PM removal performance of wet electrostatic precipitators // Energy Fuel. 2016. Vol. 30(9), P. 7465-7473.
- 10 Huang J. Y., Wang H. M., Shi Y. J. Performance of a pilot-scale wet electrostatic precipitator for the control of sulfuric acid mist // Environ Sci Pollut Res. 2016. Vol. 23(19), P. 19219–19228.
- 11 Samirys Cirqueira S. R., Hiromitsu Tanabe E., Aguiar M. L. Experimental investigation of particle deposition in filter media during filtration cycles with regeneration by pulse jet cleaning // Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 127. P. 288-298.
- 12, Songa X., Lia Y., Wangb Y., Fenga Y., Yana L., Dong Y. Synergistic capture of fine particles in wet flue gas through cooling and condensation / Cuia L. et all // Applied Energy. 2018. Vol. 225. P. 656-667.
- 13 Kozii I. S., Plyatsuk L. D., Hurets L. L. Distribution of the dispersed phase in the gas cleaning equipment with pulsating plug // Problemele Energeticii Regionale. 2021. Vol. 1(49), P. 29-38.

*L. Plyatsuk, I. Kozii*  
*Sumy State University*

### **STUDY OF HYDRODYNAMICS HIGHLY EFFICIENT DUST AND GAS CLEANING EQUIPMENT WITH A REGULAR PULSATION NOZZLE**

The work is devoted to studying the hydrodynamics of highly efficient equipment for the complex treatment of dust and gas emissions. One way to reduce dust and gas emissions is to increase the efficiency of gas cleaning equipment. The considered designs of the devices for clearing exhaust gases work in the mode of the developed turbulence. Devices with a regular pulsating nozzle are characterized by high efficiency in catching solid particles of different dispersion, self-clean the contact elements from dust, low material consumption, and high reliability in operation. The study's primary purpose is the physical description of structures and the analysis of hydrodynamic modes of operation devices for the integrated treatment of dust and gas emissions in industrial enterprises. This goal is achieved by describing the structures and the physical picture of the interaction of gas and liquid phases in the volume of the studied devices, the establishment of the main hydrodynamic modes of operation, and optimal operating ranges of equipment at gas speed. The regular arrangement of the nozzle elements on the string



allows you to organize vortex zones with a specific set step in both longitudinal and transverse cross-sections, ensuring uniform flow distribution and homogeneity of the gas-liquid layer. In the ejection and nozzle versions of devices with a regular pulsation nozzle, we can clearly distinguish three hydrodynamic modes: countercurrent, transient and direct current. The operating mode is direct current. Studies of devices with a regular pulsation nozzle suggest its use for the comprehensive treatment of dust and gas emissions of enterprises to reduce the negative impact on the environment.

**Keywords:** dust and gas cleaning equipment, a study of operating modes, hydraulic resistance, ejection zone, vortex formation, fine suspended solids.

### References

- 1 Leonard, R. L. Emission Reductions and Offsets // *Air Quality Permitting*. 2018. P. 81–91.
- 2 Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status quo, challenges and opportunities / Ahmad T. et al // *Journal of Cleaner Production*. 2021, Vol. 289, 125834.
- 3 Investigating the contribution of shipping emissions to atmospheric PM<sub>2.5</sub> using a combined source apportionment approach / Lang J. L. et al // *Environmental Pollution*. 2017. Vol. 229. P. 557-566.
- 4 Impairment of soil health due to fly ash-fugitive dust deposition from coal-fired thermal power plants / R. Raja, A. K. Nayak, A. K. Shukla, K. S. Rao // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2015. Vol. 187. P. 679.
- 5 Liao M. C., Lan K., Yao Y. Sustainability implications of artificial intelligence in the chemical industry: A conceptual framework // *Journal of industrial ecology*. 2021. Vol. 26(1). P. 164-182.
- 6 Sutherland K. Choosing equipment: Cleaning air and gas // *Filtration & Separation*. 2007. Vol. 44, №1, P. 16-19.
- 7 Hurets L. L., Kozii I. S., Miakaieva H. M. Directions of the environmental protection processes optimization at heat power engineering enterprises // *Journal of Engineering Sciences*. 2017. Vol. 4(2), P. G12-G16.
- 8 Kozii I. S., Plyatsuk L. D., Koval V. V. Algorithm for selection equipment to reduce the technogenic effect on the environment // *Problemele Energeticii Regionale*. 2022. Vol. 1(53). P. 59-67.
- 9 Xu Y. S., Liu X. W., Cui J. Field measurements on the emission and removal of PM<sub>2.5</sub> from coal-fired power stations: PM removal performance of wet electrostatic precipitators // *Energy Fuel*. 2016. Vol. 30(9), P. 7465-7473.
- 10 Huang J. Y., Wang H. M., Shi Y. J. Performance of a pilot-scale wet electrostatic precipitator for the control of sulfuric acid mist // *Environ Sci Pollut Res*. 2016. Vol. 23(19), P. 19219–19228.
- 11 Samirys Cirqueira S. R., Hiromitsu Tanabe E., Aguiar M. L. Experimental investigation of particle deposition in filter media during filtration cycles with regeneration by pulse jet cleaning // *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. Vol. 127. P. 288-298.
- 12, Songa X., Lia Y., Wangb Y., Fenga Y., Yana L., Dong Y. Synergistic capture of fine particles in wet flue gas through cooling and condensation / Cuia L. et al // *Applied Energy*. 2018. Vol. 225. P. 656-667.
- 13 Kozii I. S., Plyatsuk L. D., Hurets L. L. Distribution of the dispersed phase in the gas cleaning equipment with pulsating plug // *Problemele Energeticii Regionale*. 2021. Vol. 1(49), P. 29-38.