

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**



**Ю.О. ГІЧОВ**

**ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ**  
**Частина I**

**Дніпропетровськ НМетАУ 2015**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

**Ю.О. ГІЧОВ**

# **ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ**

## **Частина I**

Затверджено на засіданні Вченої ради академії  
в якості конспекту лекцій. Протокол №

**Дніпропетровськ НМетАУ 2015**

УДК 628.511+669.015.7.074

Гічов Ю.О. Очищення газів. Частина I: Конспект лекцій. - Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. – 51 с.

Наведені загальні відомості про очищення промислових газів: гранично припустимі концентрації, механізми уловлювання пилу, класифікація пилоуловлювачів і оцінка ефективності їх роботи.

Розглянуто апарати сухого механічного очищення газів і апарати мокрого очищення. Наведені методика та приклади розрахунків батарейного циклону і скрубера Вентурі.

Призначений для студентів напрямку 6.050601 – теплоенергетика.

Іл. 25. Табл. 7. Бібліогр.: 7 найм.

Відповідальний за випуск М.В. Губинський, д-р техн. наук, проф.

Рецензенти: В.О. Габринець, д-р техн. наук, проф. (ДНУЗТ)

О.О. Єрємін, д-р техн. наук, проф. (НМетАУ)

© Національна металургійна академія  
України, 2015

© Гічов Ю.О., 2015

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ГАЗІВ .....	5
1.1 Джерела забруднення та характеристика промислових газів .....	5
1.2 Гранично припустимі концентрації шкідливих викидів.....	6
1.3 Основні механізми уловлювання пилу .....	7
1.4 Класифікація пилоуловлювачів і оцінка ефективності їх роботи.....	8
2 АПАРАТИ СУХОГО МЕХАНІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ .....	10
2.1 Пилоосаджувальні камери .....	10
2.2 Інерційні пилоуловлювачі.....	12
2.3 Циклони.....	16
2.4 Розрахунок батарейного циклону.....	19
2.4.1 Методика розрахунку .....	19
2.4.2 Приклад розрахунку .....	22
3 АПАРАТИ МОКРОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ.....	25
3.1 Зрошувані газоходи.....	25
3.2 Промивні камери .....	26
3.3 Скрубери .....	26
3.4 Апарати ударно-інерційної дії .....	30
3.5 Тарілчасті газопромивачі .....	32
3.6 Швидкісні газопромивачі .....	35
3.7 Розрахунок скрубера Вентурі .....	41
3.7.1 Методика розрахунку .....	41
3.7.2. Приклад розрахунку .....	44
ЛІТЕРАТУРА.....	48
ДОДАТОК.....	49

## ВСТУП

Даний конспект лекцій з дисципліни «Очищення газів» призначений для студентів, що навчаються за спеціальністю 6.050601 – теплоенергетика.

Для теплоенергетики ця дисципліна має особливе значення, тому що енергетичні промислові об'єкти (теплові електростанції, котельні та ін.) є найбільшими джерелами пилогазових викидів в атмосферу. У зв'язку з цим при проектуванні та експлуатації енергетичних установок слід володіти необхідною інформацією про можливість зниження шкідливих газопилових викидів в атмосферу і знаннями достатніми для використання пилоуловлюючого обладнання на практиці: розрахунок, вибір обладнання та експлуатація.

У зміст дисципліни входить системне вивчення основних видів пилоуловлювачів: апарати сухого та мокрого очищення газів, механічні фільтри й фільтри очищення газів в електричному полі. Розглядаються також основні напрямки видалення з промислових газів шкідливих газоподібних компонентів: оксидів сірки, вуглецю та азоту.

У конспекті наведені приклади розрахунку основних видів пилоуловлювачів, а також відомості про конструкції серійних пилоуловлювачів, що дозволяє отримати навички вибору необхідного пилоуловлюючого обладнання при вирішенні проектних і практичних задач в процесі експлуатації енергетичних установок.

Теоретично дисципліна «Очищення газів» базується на основі таких загальнотехнічних дисциплін, як «Гідрогазодинаміка», «Технічна термодинаміка», «Тепломасообмін», «Електротехніка», а за змістом пов'язана практично з усіма спеціальними дисциплінами за напрямком 6.050601 – теплоенергетика: «Паливо і його спалювання», «Джерела тепlopостачання промислових підприємств», «Високотемпературні теплотехнологічні процеси», «Теплові електростанції» та ін.

Даний конспект лекцій відповідає робочій програмі з дисципліни «Очищення газів» для спеціальності 6.050601 – теплоенергетика і може бути використаний студентами-теплоенергетиками при виконанні курсових і дипломних проектів, а також випускних робіт бакалаврів і магістрів.

# 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ГАЗІВ

## 1.1 Джерела забруднення та характеристика промислових газів

Слід виділити чотири основних джерела забруднення атмосфери:

- промислові підприємства;
- теплові електростанції;
- транспорт;
- котельні в системах опалення житлово-комунального господарства.

В числі промислових підприємств помітно виділяються по пилогазовим викидам підприємства чорної металургії, на частку яких приходить:  $\approx 20\%$  пилу,  $\approx 40\%$  оксиду вуглецю,  $\approx 15\%$  оксидів сірки і  $\approx 20\%$  оксидів азоту. В районах розташування великих металургійних підприємств забруднення атмосфери більш ніж на 50-60% обумовлено викидами цих підприємств.

Таблиця 1.1 – Орієнтовний розподіл викидів по окремих виробництвах підприємств чорної металургії, %:

Найменування виробництва	Найменування викидів		
	Пил	CO	SO <sub>2</sub>
Агломераційне	30	35	35
Коксохімічне	5	20	25
Доменне	10	10	15
Мартенівське	10	5	5
Киснево-конверторне	20	15	10
Прокатне	-	5	5
Енергогосподарство (ТЕЦ)	25	10	5

Забруднені промислові гази являють собою продукти згоряння палив зі зваженими частинками золи і технологічного пилу. Зважені частки пилу в залежності від розміру розділяються на фракції.

*Фракцією* називають масову частку частинок, розміри яких знаходяться в інтервалі значень, прийнятих в якості нижньої та верхньої меж цієї фракції. Розмір частинок пилу виражається зазвичай у мікрометрах (мкм).

Наприклад, пил, що містить частинки до 100 мкм, може бути поділений на наступні фракції, мкм: 0-5; >5-10; >10-15; >15-20; >20-30... >90-100. Поділ на фракції дає дисперсний склад пилу.

Розміри частинок пилу залежать в основному від умов їх утворення. В результаті механічних процесів (дроблення, розмелювання, стирання та інші.) розміри частинок пилу знаходяться в межах 5-10 мкм. В результаті високотемпературних термохімічних процесів розміри частинок пилу становлять до 5 мкм. Пил, що утворюється в результаті горіння палива (зола), має розміри 5-70 мкм.

Розміри пилу та його дисперсний склад є основними критеріями для вибору пилоуловлювачів.

## 1.2 Гранично припустимі концентрації шкідливих викидів

Гранично припустимі концентрації (ГПК) являють собою максимальні концентрації шкідливих речовин в навколишньому повітрі, при яких щоденний вплив на протязі необмеженого часу не викликає будь-яких хворобливих змін в організмі людини.

У зв'язку з можливими коливаннями концентрації шкідливої речовини протягом доби розрізняють максимальну разову гранично припустиму концентрацію (ГПК<sub>м.р.</sub>) та середньодобову гранично припустиму концентрацію (ГПК<sub>с.д.</sub>).

ГПК<sub>м.р.</sub> визначається в пробах повітря протягом 20 хвилин. ГПК<sub>с.д.</sub> визначається як середньозважена величина в пробах повітря протягом 24 годин. В обох випадках ГПК встановлюється на основі науково-обґрунтованих санітарних норм.

Таблиця 1.2 – ГПК найбільш характерних забруднюючих речовин металургійних виробництв

Найменування речовини	ГПК, мг/м <sup>3</sup>	
	м.р.	с.д.
Пил (нетоксичний)	0,50	0,05
Оксид вуглецю (CO)	3,00	1,00
Діоксид сірки (SO <sub>2</sub> )	0,50	0,05
Оксид азоту (NO)	0,60	0,06

Для санітарної оцінки повітряного середовища робочої зони застосовують показник гранично припустимої концентрації робочої зони ГПКр.з. Оскільки час перебування людини в зоні становить 6-8 годин, тобто значно менше тривалості доби, то ГПКр.з. вище ГПКс.д..

Для шкідливих речовин що викидаються в атмосферу з промисловими газами повинна дотримуватися умова:

$$\frac{C}{\text{ГПК}} \leq 1, \quad (1.1)$$

де  $C$  – концентрація шкідливої речовини в атмосфері повітря; ГПК – гранично припустима концентрація речовини в атмосферному повітрі (максимально разова або середньодобова залежно від характеру викидів).

При одночасній присутності декількох шкідливих речовин з однаково направленим характером шкідливого впливу необхідний облік їх сумарного впливу, що забезпечується умовою:

$$\frac{C_1}{\text{ГПК}_1} + \frac{C_2}{\text{ГПК}_2} + \dots + \frac{C_i}{\text{ГПК}_i} \leq 1, \quad (1.2)$$

де  $C_{1,2,\dots,i}$  і  $\text{ГПК}_{1,2,\dots,i}$  – фактичні і гранично припустимі концентрації шкідливих речовин, що характеризуються однаково направленим шкідливим впливом.

### 1.3 Основні механізми уловлювання пилу

Пиловлловлювання засноване на використанні одного або декількох механізмів осаджування зважених в газі частинок. У числі основних механізмів слід виділити:

- гравітаційне осадження;
- інерційне осадження;
- осадження під дією відцентрової сили;
- осадження внаслідок зачеплення (торкання);
- електричне осадження.

*Гравітаційне осадження* відбувається в результаті вертикального осадження частинок під дією сили тяжіння при проходженні їх через газоочисний апарат.



*Інерційне осадження* відбувається в тому випадку, коли маса і швидкість частинок пилу забезпечують достатню інерцію руху для виділення частинок з потоку газу при різкій зміні лінії струму газу.

Осадження під дією *відцентрової сили* відбувається при криволінійному русі запиленого потоку газу, що зумовлює виникнення відцентрових сил, під дією яких частинки виділяються з потоку газу і відкидаються на поверхню осадження газоочисного апарату.

*Зачеплення (торкання)* частинок пилу відбувається в тому випадку, коли відстань від центру частинок пилу до перешкоди, яку обтікає газовий потік, дорівнює або менше радіуса частинки.

*Електричне осадження* відбувається внаслідок іонізації газового потоку, що призводить до придбання частинками пилу певного електричного заряду достатнього для виділення частинок з потоку газу під дією електричного поля і спрямованого руху частинок до поверхні газоочисного апарату, що має протилежний заряд.

#### **1.4 Класифікація пилоуловлювачів і оцінка ефективності їх роботи**

У числі найбільш застосовуваних пилоуловлювачів можна виділити чотири класи:

- апарати сухого механічного очищення газу;
- апарати мокрого очищення газу;
- апарати для очищення газу фільтрацією (фільтри);
- апарати для очищення газу в електричному полі (електрофільтри).

Залежно від кінцевого вмісту пилу в газі, що проходить очищення, розрізняють такі види пилоуловлювачів:

- апарати грубого очищення газу (кількість пилу на виході понад  $1\text{г/м}^3$ );
- апарати середнього очищення газу (вміст пилу на виході  $0,1-1,0\text{г/м}^3$ );
- апарати тонкого очищення газу (кількість пилу на виході до  $0,1\text{г/м}^3$ ).

Для агрегатів чорної металургії вважається необхідним очищення газів, що виділяються, від пилу до концентрації  $100\text{ мг/м}^3$ , при якій забарвлення газу стає ледь помітним. При більш високих концентраціях пилу газу, що відходять, мають помітний бурий колір, обумовлений вмістом в газах оксидів заліза.

При використанні газу для хімічної переробки або як паливо до ступеня очищення газу висуваються вимоги технологічного процесу, в якому

передбачається використовувати газ. Наприклад, при використанні газу як палива запиленість газу не повинна перевищувати  $10 \text{ мг/м}^3$ .

Ефективність очищення газу в пилоуловлювачі (ступінь уловлювання) може бути визначена за вмістом пилу в газах до і після газоочисного апарату:

$$\eta = \frac{z_{\text{п}} - z_{\text{к}}}{z_{\text{п}}} \cdot 100, \quad \%, \quad (1.3)$$

де  $z_{\text{п}}$  і  $z_{\text{к}}$  – відповідно, початкова та кінцева концентрація пилу в газі.

При відомому фракційному складі пилу і ступеня уловлювання окремих фракцій загальна ступінь очищення газу може бути обчислена за формулою:

$$\eta = \frac{\Phi_1 \cdot \eta_{\phi 1}}{100} + \frac{\Phi_2 \cdot \eta_{\phi 2}}{100} + \dots + \frac{\Phi_n \cdot \eta_{\phi n}}{100} = \frac{1}{100} \sum_1^n \Phi_i \cdot \eta_{\phi i}, \quad (1.4)$$

де  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$  – вміст (по масі) окремих фракцій на вході в апарат, %;  $\eta_{\phi 1}, \eta_{\phi 2}, \dots, \eta_{\phi n}$  – ступінь уловлювання фракцій, частки од.

При багатоступінчастому очищенні газу в декількох послідовно встановлених апаратах загальний ступінь очищення газу визначається за формулою:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_n), \quad (1.5)$$

де  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$  – ступінь очищення газу відповідно в першому, в другому та n-му пилоуловлювачі.

Ефективність уловлювання пилу може бути виражена у вигляді коефіцієнта проскоку пилу (ступеня неповноти уловлювання), який являє собою відношення концентрації частинок в газі за пилоуловлювачем до концентрації частинок перед пилоуловлювачем.

За відомого ступеня уловлювання газоочисного апарату  $\eta$  коефіцієнт проскоку  $\zeta$  обчислюється за формулою:

$$\zeta = 1 - \eta. \quad (1.6)$$

## 2 АПАРАТИ СУХОГО МЕХАНІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ

В апаратах сухого механічного очищення пиловловлювання досягається виключно механічним впливом на пил внаслідок гравітаційних, інерційних і відцентрових сил. У більшості випадків ці сили діють на частинки пилу спільно. Тим не менш, для окремих апаратів сухого механічного очищення один із впливів може переважати, що дозволяє за цією ознакою виділити наступні групи апаратів сухого очищення: пилоосаджувальні камери, інерційні пилоуловлювачі та циклони.

### 2.1 Пилоосаджувальні камери

Пилоосаджувальні камери застосовують для попереднього грубого очищення газів від пилу порівняно великих розмірів ( $> 50-100$  мкм). Виділення частинок пилу з газу здійснюється тут внаслідок гравітації (див. рис. 2.1).

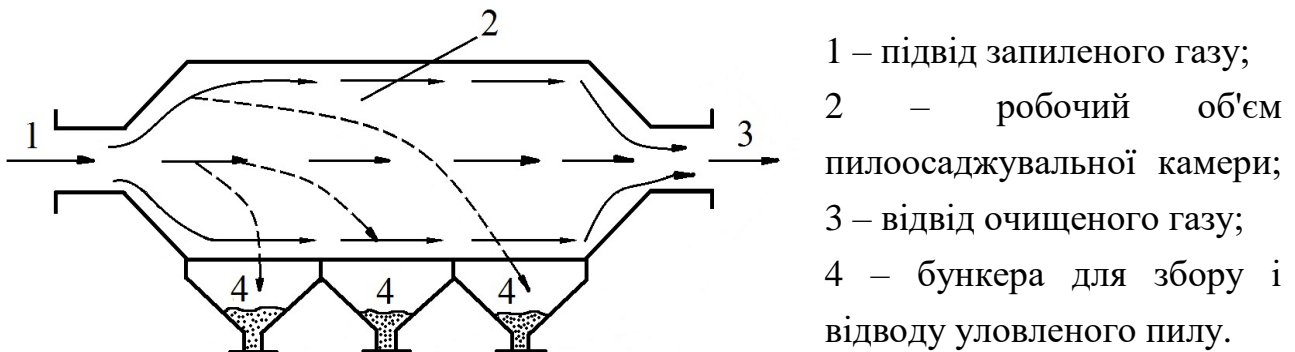


Рисунок 2.1 – Конструкція пилоосаджувальної камери

Для гравітаційного осадження пилу необхідно, щоб частинки пилу встигли осісти в камері за час перебування в ній, що відображає наступна рівність співвідношень:

$$L/w_{\Gamma} = H/w_{вч}, \quad (2.1)$$

де  $L$  – довжина пилоосаджувальної камери, м;  $w_{\Gamma}$  – швидкість газу, м/с;  $H$  – висота пилоосаджувальної камери, м;  $w_{вч}$  – швидкість витання частинок пилу (середня швидкість падіння частинок в нерухомому газі), м/с.

У лівій частині рівняння (2.1) – час знаходження частинок пилу при їх русі в камері зі швидкістю потоку газу:

$$\tau_1 = L/w_{\Gamma}. \quad (2.2)$$

У правій частині рівняння (2.1) – час необхідний для гравітаційного осаджування частинок пилу:

$$\tau_2 = H/w_{вч} . \quad (2.3)$$

Для осаджування пилу необхідне виконання умови  $\tau_1 \geq \tau_2$ .

Рівняння 2.1 можна використовувати для орієнтовних конструкторських розрахунків пилоосаджувальної камери. Наприклад, при відомій висоті камери  $H$  довжина камери  $L$  складе:

$$L = H \cdot (w_{г}/w_{вч}) . \quad (2.4)$$

Швидкість газу  $w_{г}$  в пилоосаджувальних камерах складає в межах  $0,2 \div 0,8$  м/с. Ступінь уловлювання залежить від розмірів пилу і, наприклад, для частинок 50 мкм, може складати 80-90%.

*Перевагою* пилоосаджувальних камер є простота конструкції. *Недоліком* – громіздкість. Для гравітаційного осаджування пилу необхідно досить тривале перебування пилу в камері, а отже невеликі швидкості газу, що збільшує поперечний переріз пилоосаджувальної камери і розміри камери в цілому.

Одним з варіантів удосконалення пилоосаджувальної камери є розміщення в робочому об'ємі камери горизонтальних або похилих полиць (див. рис. 2.2).

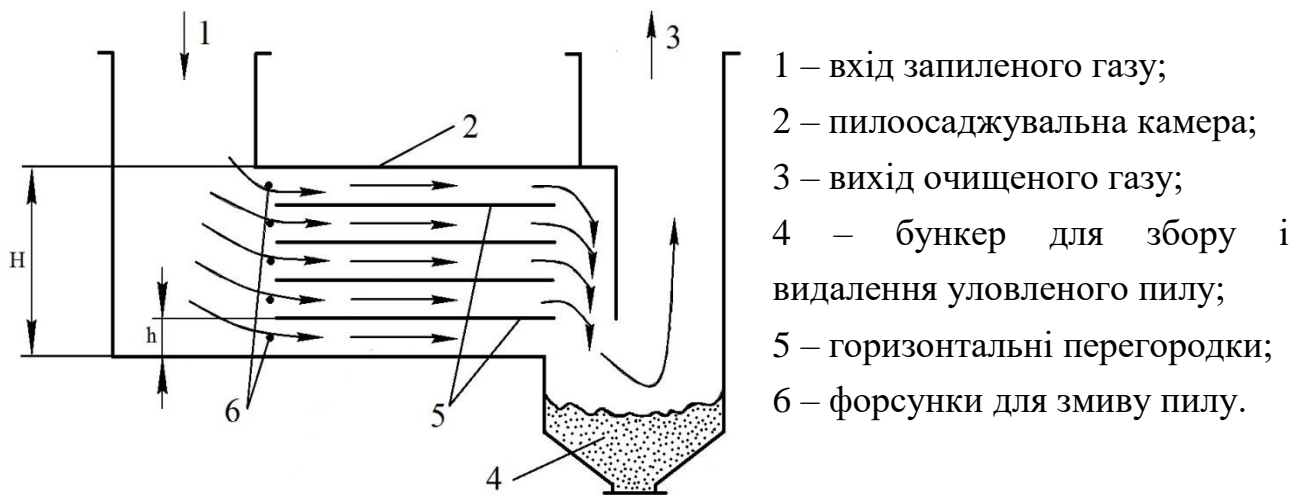


Рисунок 2.2 – Пилоосаджувальна камера з горизонтальними полицями

Горизонтальні полки поділяють робочий об'єм пилоосаджувальної камери на ряд осередків, які виконують функцію автономних пилоосаджувальних камер з висотою  $h$ :

$$h = H/(n + 1), \quad (2.5)$$

де  $n$  – кількість полиць;  $H$  – висота пилоосаджувальної камери.

Час гравітаційного осаджування в осередку складе:

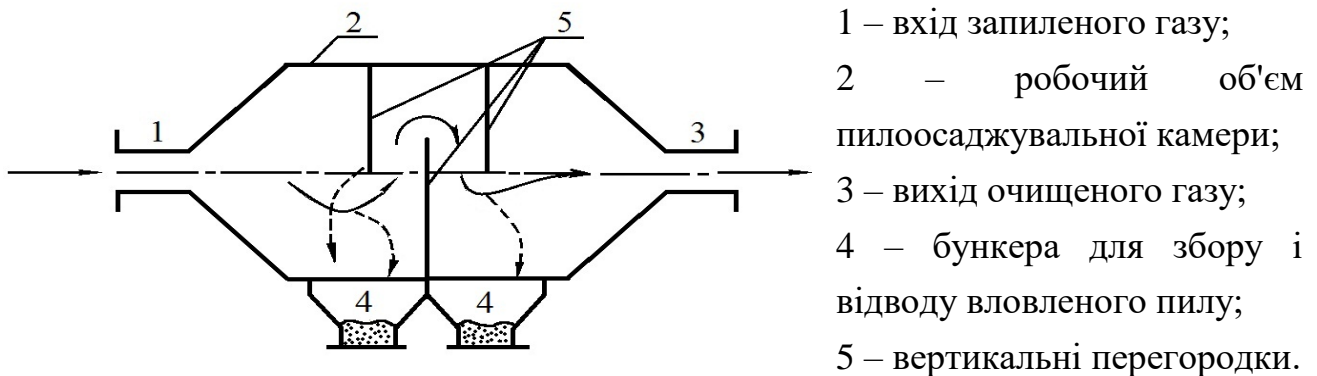
$$\tau_2 = h/w_{вч} = H/(n + 1) \cdot w_{вч}. \quad (2.6)$$

З виразу (2.6) випливає, що в разі установки горизонтальних полиць час необхідний для гравітаційного осаджування частинок зменшується в  $(n + 1)$  раз, а отже, зменшується довжина осаджувальної камери.

$$L = h \cdot (w_{г}/w_{вч}). \quad (2.7)$$

Певну складність при установці полиць викликає видалення пилу з пилоосаджувальної камери. Для цього пилоосаджувальні камери обладнують форсунками для періодичного змиву пилу водою.

Удосконалення пилоосаджувальних камер досягається також встановленням вертикальних перегородок (див. рис. 2.3).



- 1 – вхід запиленого газу;
- 2 – робочий об'єм пилоосаджувальної камери;
- 3 – вихід очищеного газу;
- 4 – бункера для збору і відводу вловленої пилу;
- 5 – вертикальні перегородки.

*Рисунок 2.3 – Пилоосаджувальна камера з вертикальними перегородками*

Вертикальні перегородки, забезпечуючи багаторазову зміну напрямку потоку газу, сприяють не тільки гравітаційному, а й інерційному видаленню частинок пилу.

## 2.2 Інерційні пилоуловлювачі

В інерційних пилоуловлювачах поряд з гравітаційними силами велике значення в осадженні пилу набуває інерція руху частинок. Для цього в пилоосаджувальному апараті забезпечується різка зміна напрямку руху потоку

газу. Пилові частинки прагнуть в силу інерції зберегти напрямок руху газу і при зміні напрямку випадають з потоку.

Інерційні пилоуловлювачі відрізняються між собою в залежності від конструктивного рішення, що забезпечує зміну напрямку потоку газу. Можливі, наприклад, такі варіанти:

- з центральним підведенням газу (радіальні пилоуловлювачі);
- з боковим підведенням газу;
- з вертикальною перегородкою;
- з жалюзійними решітками.

В інерційному пилоуловлювачі з *центральним підведенням* газу потік запиленого газу, що надходить через центральну трубу, робить поворот на 180° і розподіляється в кільцевому перерізі пилоуловлювача (див. рис. 2.4).

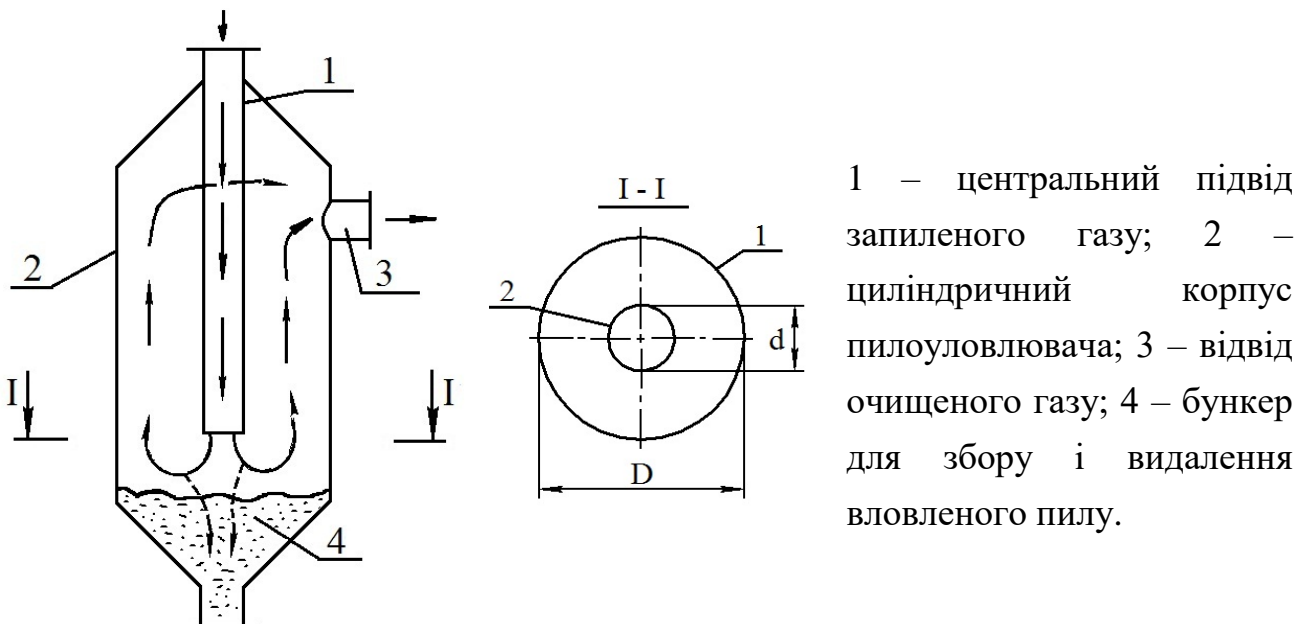


Рисунок 2.4 – Інерційний пилоуловлювач з центральним підведенням газу

Швидкість газу в кільцевому перерізі пилоуловлювача повинна бути менше швидкості витання частинок:

$$w_{вч} < w_{г} = \frac{V_{г}}{\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{V_{г}}{\pi(D^2 - d^2)}, \quad (2.8)$$

де  $V_{г}$  – витрата запиленого газу в пилоуловлювачі;  $D$  – діаметр циліндричного корпусу пилоуловлювача;  $d$  – діаметр центральної труби що підводить.

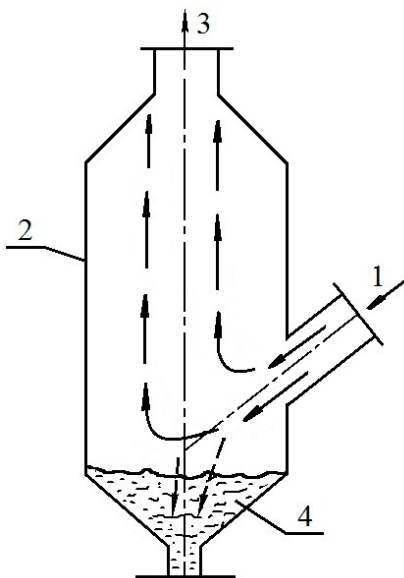
Вираз (2.8) можна використовувати для орієнтовного конструктивного розрахунку інерційного радіального пилоуловлювача. Наприклад, при відомій швидкості витання частинки  $i$  при певному діаметрі труби  $d$  центрального підвода запиленого газу діаметр пилоуловлювача  $D$  визначається за формулою:

$$D^2 - d^2 = \frac{4V}{\pi w_{\Gamma}} \quad \text{або} \quad (2.9)$$

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi w_{\Gamma}} + d^2}. \quad (2.10)$$

Радіальні пилоуловлювачі найефективніше працюють при швидкості газу в кільцевому зазорі  $0,6 \div 1,0$  м/с. При цьому для частинок більше 25-30 мкм ступінь уловлювання пилу може скласти 65-85 %.

В інерційному пилоуловлювачі з боковим підведенням газу зміна напрямку потоку газу досягається розміщенням патрубку для підведення газу в нижній частині корпусу пилоуловлювача (див. рис. 2.5). При цьому відведення газу здійснюється в верхній частині пилоуловлювача, що викликає різкий поворот газу в нижній частині в сторону виходу й інерційне відділення частинок пилу.



- 1 – бічний підвід запиленого газу;
- 2 – циліндричний корпус пилоуловлювача;
- 3 – відвід очищеного газу;
- 4 – бункер для збирання пилу.

*Рисунок 2.5 – Інерційний пилоуловлювач з боковим підведенням газу*

Зміна напрямку потоку і ефективність інерційного відділення пилу залежить тут від кута нахилу вхідного патрубку до осі вертикального корпусу пилоуловлювача. Залежно від швидкості входу газу в корпус пилоуловлювача кут нахилу патрубку змінюється в межах  $30 \div 60^\circ$ .

В інерційному пилоуловлювачі з вертикальною перегородкою (див. рис. 2.6) зміна напрямку потоку газу і ступінь уловлювання пилу визначається положенням перегородки стосовно входу газу в пилоуловлювач.

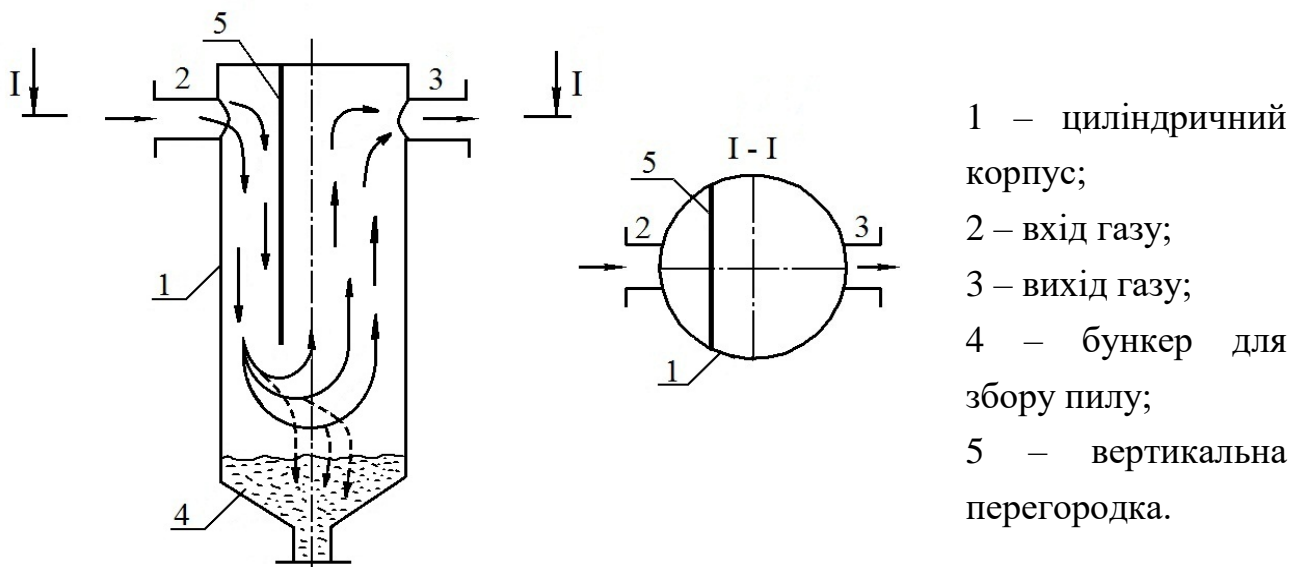


Рисунок 2.6 – Інерційний пилоуловлювач з вертикальною перегородкою

Зміщення перегородки в сторону вхідного патрубку забезпечує зниження швидкості газу перед вихідним патрубком, що сприяє не тільки інерційному, але й гравітаційному осадженню пилу.

До числа інерційних пилоуловлювачів відносяться також жалюзійні пилоуловлювачі (див.рис.2.7), які зазвичай виконують функцію концентраторів пилу, що полегшує подальше очищення газу.

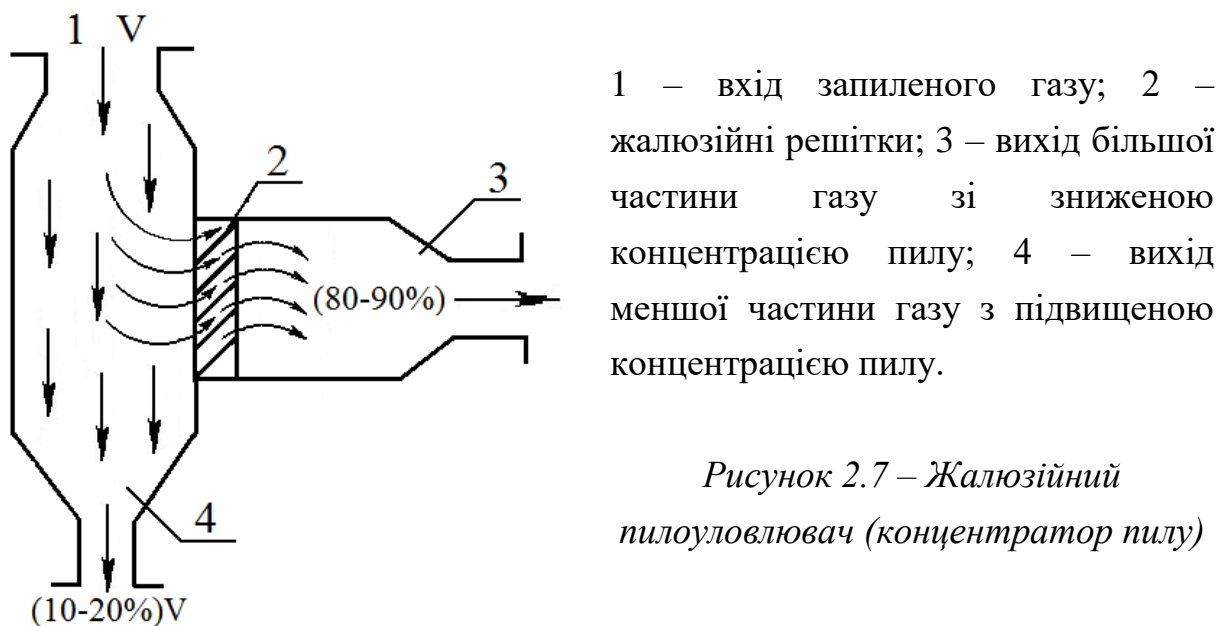


Рисунок 2.7 – Жалюзійний пилоуловлювач (концентратор пилу)



В жалюзійних пилоуловлювачах потік запиленого газу розділяється на дві частини. Більша частина газу (80-90%) відводиться примусовою тягою в бічній газохід через жалюзі і частково звільняється від пилу. У меншій частини газу, що проходить повз жалюзі (10-20%), концентрація пилу збільшується: по-перше, внаслідок інерції руху пилу при повороті газу в жалюзійній решітці, і, по-друге, внаслідок відображення частинок пилу при ударі об жалюзійну решітку. Жалюзійні решітки застосовують для концентрації пилу більше 20 мкм. Швидкість газів в решітках 12-15 м/с.

Після жалюзійного концентратора потік газу з більшою концентрацією пилу направляється на очищення, наприклад, в циклони. При цьому внаслідок невеликого об'єму газу з концентрованим пилом потрібні апарати очищення менших розмірів порівняно з очищенням всього потоку газу.

*Недоліком* жалюзійних пилоуловлювачів є абразивний знос решіток і відкладення пилу всередині решіток.

### 2.3 Циклони

В циклонах поряд з гравітацією й інерцією значення набувають відцентрові сили, (див.рис.2.8). Тангенціальний підвід газу в циклоні забезпечує обертання потоку і відповідно появу відцентрових сил, які відкидають частинки до стінок циклону, де відбувається гальмування частинок пилу і гравітаційне сповзання пилу в бункер.

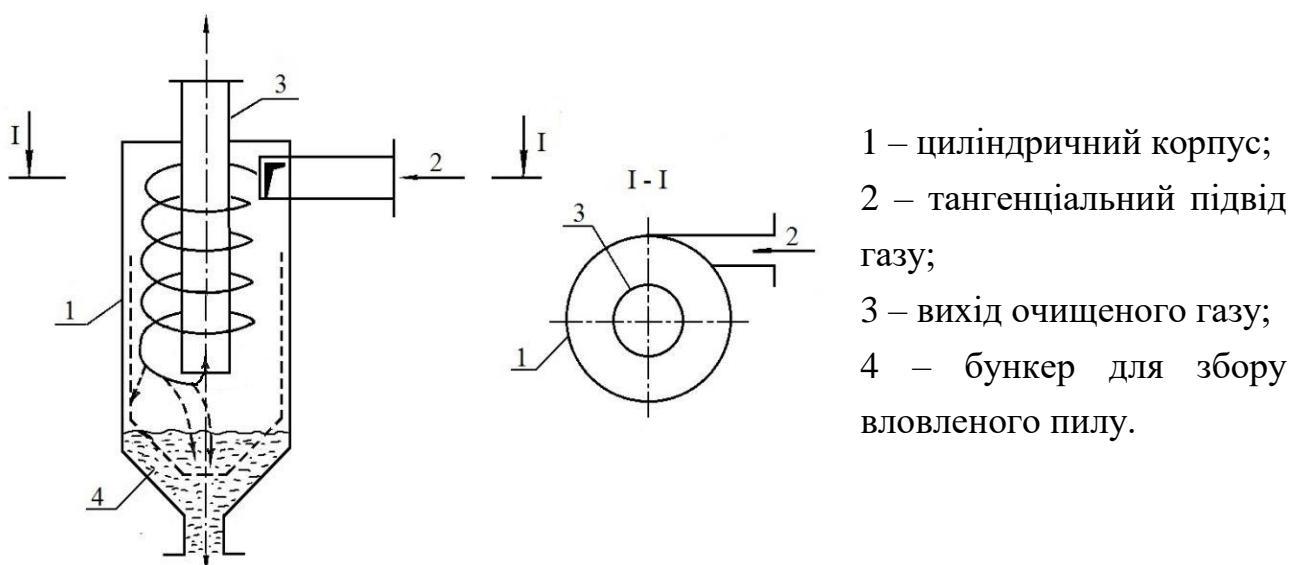
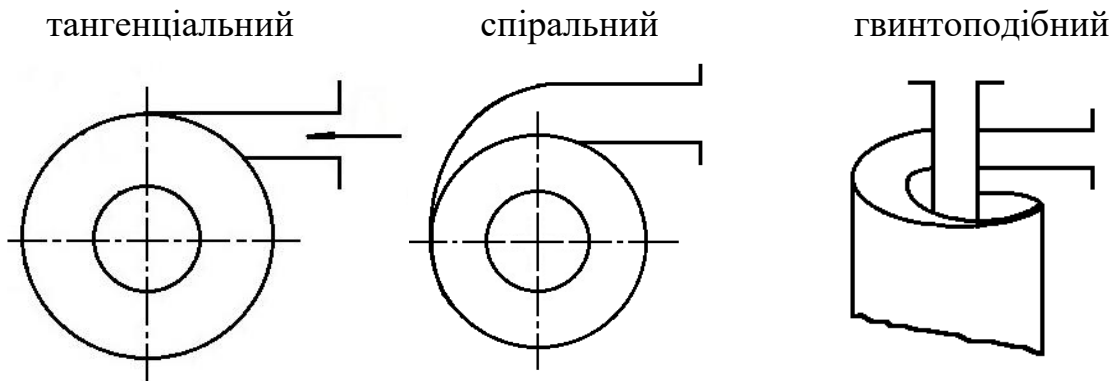


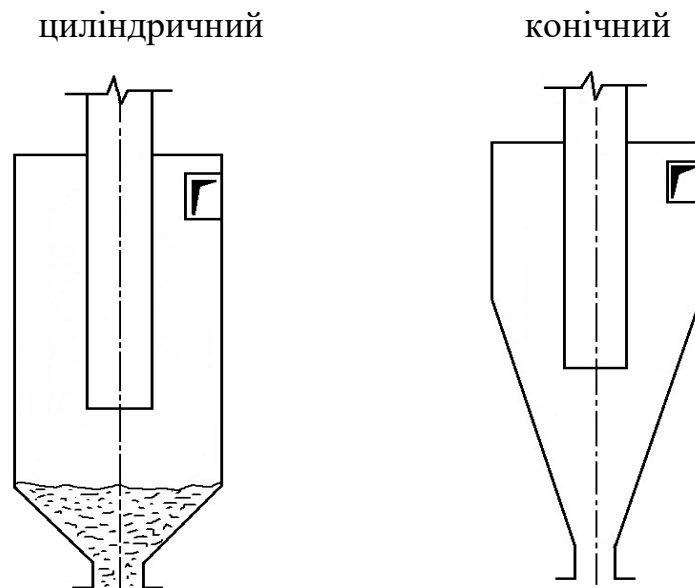
Рисунок 2.8 – Циклон с тангенціальним підведенням газу

Оптимальна швидкість газу на вході в циклон 20-25 м/с. При меншій швидкості недостатній вплив виникаючих відцентрових сил на частинки пилю. При більш високих швидкостях відбувається відскакування частинок пилю від стінок циклону в потік газу, що знижує ефект очищення.

*Основні варіанти підведення газу:*

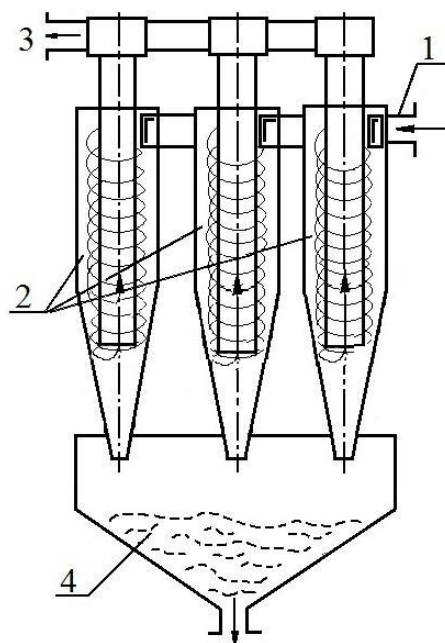


*Залежно від конфігурації корпусу циклони діляться на два види:*



Поодинокі циклони, як правило, виконують циліндричними.

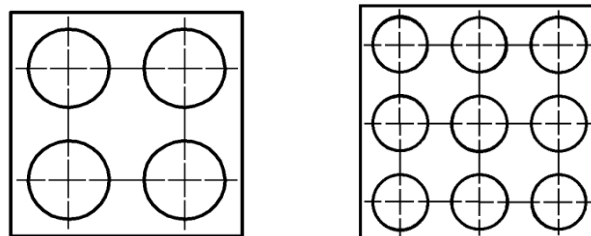
Зі збільшенням діаметра циклону ефективність пиловловлювання в циклоні знижується, так як зменшується закручування газового потоку і відповідно знижується дія відцентрових сил на частинки. У тому випадку, якщо кількість газу, що надходить на очищення, вимагає встановлення циклону діаметром більше 800 мм, циклон роблять груповим, тобто таким, що складається з групи циклонів меншого діаметра. Таким чином, груповий циклон представляє собою групу паралельно підключених по газу циклонів менших розмірів порівняно з одиночним циклоном (див. рис.2.9).



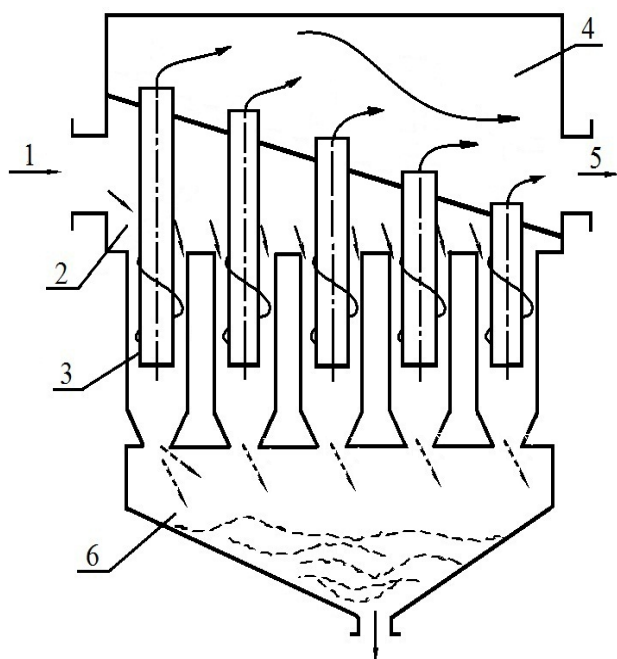
- 1 – колектор для тангенціального підведення газу;
- 2 – елемент групового циклону;
- 3 – колектор для відводу очищеного газу;
- 4 – бункер для збору вловленої пилу.

Рисунок 2.9 – Груповий циклон

Розміщення елементів групового циклону:



При кількості циклонів більше дев'яти слід застосовувати батарейні циклони (див. рис. 2.10).



- 1 – підвідний патрубок запиленого газу;
- 2 – розподільна камера;
- 3 – елемент батарейного циклону з гвинтовим підведенням газу;
- 4 – камера очищеного газу;
- 5 – патрубок для очищеного газу;
- 6 – бункер для збору вловленої пилу.

Рисунок 2.10 – Батарейний циклон

Найбільш ефективно (до 80%) в циклонах уловлюються частинки більше 10 мкм. Для частинок менше 5 мкм циклони малоефективні.

## 2.4 Розрахунок батарейного циклону

### 2.4.1 Методика розрахунку

Залежно від властивостей вловлюваного пилю вибирається тип напрямного апарату циклонних елементів (див. рис.2.11).

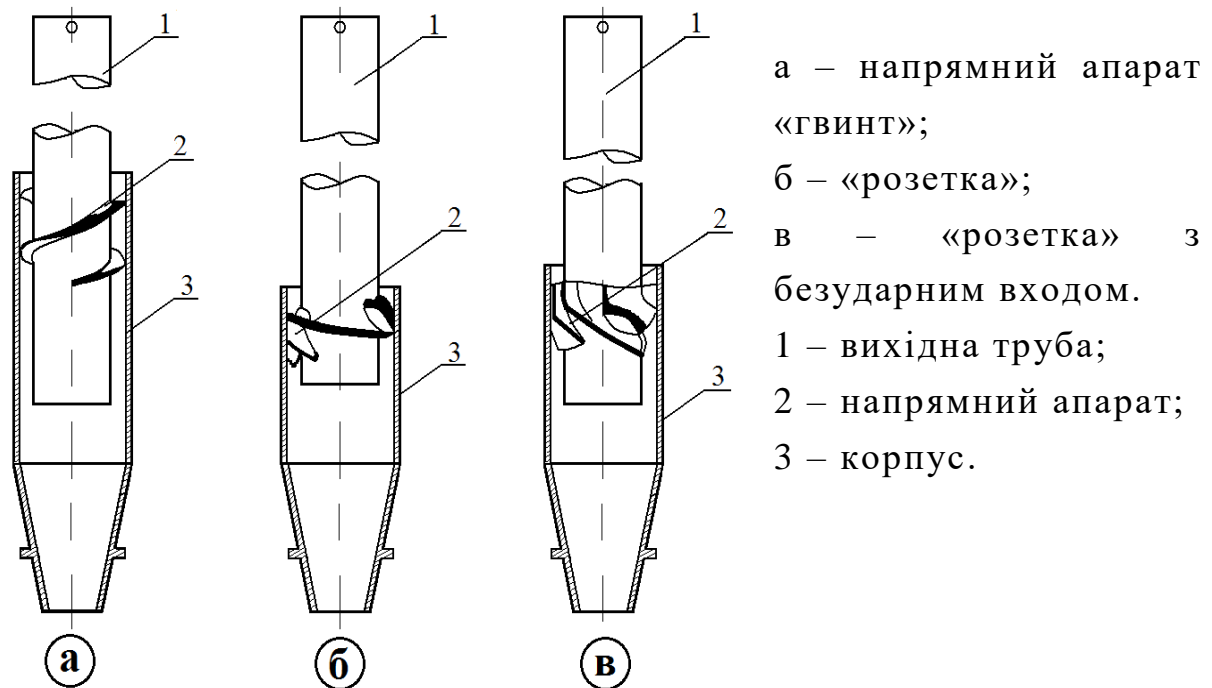


Рисунок 2.11 – Елементи батарейного циклону

Для пилю, схильного до злипання, застосовують напрямний апарат типу «ГВИНТ», який менш схильний до забивання пилом. Діаметр циклонного елемента приймають залежно від запиленості газу, що надходить на очищення.

Таблиця 2.1 – Допустима запиленість газу ( $\text{г}/\text{м}^3$ ), що надходить на очищення, в залежності від діаметру циклонного елемента

Діаметр циклонного елемента, мм		100	150	250
Тип напрямного апарату	«ГВИНТ»	25	50	100
	«розетка»	15	35	75

Втрата тиску в батарейному циклоні, визначається по формулі:

$$\Delta P = \zeta \frac{w^2}{2} \rho, \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad (2.11)$$

де  $\zeta$  – коефіцієнт гідравлічного опору циклонного елементу;  $w$  – умовна швидкість газу в циклонному елементі, м/с;  $\rho$  – густина газу за робочих умов, кг/м<sup>3</sup>.

Для напрямних апаратів типа «гвинт»  $\zeta=85$ , для апаратів типа «розетка» з лопатками, нахиленими під кутом  $\alpha=25^\circ - \zeta=90$ , а при  $30^\circ - \zeta=65$ .

Умовна швидкість газу в циклонах складе:

$$w = (4 \cdot V_1) / (\pi \cdot D^2), \text{ м/с}, \quad (2.12)$$

де  $V_1$  – витрата газу через один циклонний елемент за робочих умов, м<sup>3</sup>/с;  $D$  – діаметр циклонного елементу, м.

Для батарейних циклонів при  $\zeta=85-90$  оптимальне значення умовної швидкості  $w_{\text{опт}}=3,85$  м/с, а при  $\zeta=65$  оптимальне значення –  $w_{\text{опт}}=4,5$  м/с. Значення умовної швидкості газу за робочих умов не повинно відхилятися від оптимального більш, ніж на  $\pm 15\%$ .

Витрата газу через один циклонний елемент складе:

$$V_1 = w_{\text{опт}} \cdot (\pi \cdot D^2) / 4, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.13)$$

Потрібна кількість циклонних елементів визначається відношенням:

$$N = V / V_1, \quad (2.14)$$

де  $V$  – об'єм газу що поступає на очищення за робочих умовах, м<sup>3</sup>/с.

Ступінь уловлювання пилу в елементі батарейного циклону визначається в наступній послідовності.

На підставі математичної обробки рівняння для імовірнісних функцій отримано вираз для визначення ступеня уловлювання пилу циклоном:

$$\eta = 100 \cdot \Phi(x), \%. \quad (2.15)$$

Значення нормальної функції розподілу  $\Phi(x)$  приведені в додатку А.

Значення  $x$  стосовно циклонів обчислюють за формулою:

$$x = \frac{\lg \cdot (d_m / d_{50})}{(\lg^2 \sigma_T + \lg^2 \sigma_n)^{0,5}}, \quad (2.16)$$

де  $d_m$  – середньомедіанний розмір уловлюваних частинок пилу (розмір частинки, при якому маса всіх частинок розміром більших за  $d_m$  дорівнює масі всіх частинок менших за  $d_m$ ), мкм;  $d_{50}$  – розмір частинок, уловлюваних на 50%

обраним циклоном за фактичних умов роботи, мкм;  $lg\sigma^T$  – величина, що характеризує дисперсію частинок пилу, уловлюваних в умовному циклоні;  $lg\sigma_n$  – середньоквадратичне відхилення функції розподілу (дисперсія) уловлюваних частинок пилу, яке визначає співвідношення:

$$lg\sigma_n = \frac{lgd_{84,1}}{d_m} = \frac{lgd_m}{d_{15,9}}, \quad (2.17)$$

тут  $d_{84,1}$  і  $d_{15,9}$  – розмір частинок пилу, для яких маса всіх частинок, що мають розмір менше  $d_{84,1}$  і  $d_{15,9}$ , становить відповідно 84,1% та 15,9% загальної маси пилу.

Потрібні для цих розрахунків значення параметрів  $d_{50}^T$  і  $lg\sigma^T$  наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри, що визначають ступінь уловлювання пилу елементами батарейних циклонів

Характеристики елемента			$d_{50}^T$ , мкм	$lg\sigma^T$
тип напрямного апарату	кут нахилу $\alpha$ , град	діаметр D, мм		
гвинт	25	250	4,5	0,46
розетка	25	250	3,85	0,46
розетка	30	250	5,0	0,46
розетка	25	150	3,38	0,46
розетка	25	100	3,0	0,46

Розмір частинок, уловлюваних елементами батарейного циклону на 50%, визначається за формулою:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{(\rho_{1T}/\rho_1 \cdot \mu/\mu_T \cdot w_T/w)}, \text{ мкм}, \quad (2.18)$$

де  $d_{50}^T$  – розмір частинок, уловлюваних на 50% умовним елементом (див. табл.2.2);  $\rho_1$ ,  $\mu$ ,  $w$  – параметри, що відповідають фактичним умовам роботи;  $\rho_{1T}$ ,  $\mu_T$ ,  $w_T$  – параметри, що відповідають умовам, узятим для умовного елемента батарейного циклону:

$$\rho_{1T}=2200 \text{ кг/м}^3;$$

$$\mu_T=23,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с};$$

$$w_T=4,5 \text{ м/с}.$$

Отримане значення  $d_{50}$  використовують для обчислення  $x$  (формула 2.16). В свою чергу  $x$  дозволяє визначити за додатком А значення відповідної функції  $\Phi(x)$ . Обчислений за формулою (2.15) ступінь уловлювання пилу елементом батарейного циклона зіставляють з потрібним значенням.

У разі необхідності ступінь уловлювання пилу може бути збільшений зменшенням діаметра елемента батарейного циклону або вибором більш ефективного типу напрямного апарату.

Ступінь уловлювання пилу батарейним циклоном зазвичай нижчий, ніж його окремими елементами. Це викликано перетіканням очищуваного газу між елементами циклона, внаслідок різниці значень їхніх гідравлічних опорів.

## 2.4.2 Приклад розрахунку

Розрахувати батарейний циклон для очищення газів агломераційної машини, визначити його гідравлічний опір і ступінь уловлювання пилу при наступних вихідних даних: кількість газу, що надходить на очищення за нормальних умов  $V_0=200000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; густина газу за нормальних умов  $\rho_0=1,29 \text{ кг/м}^3$ ; температура газу  $t=150^\circ\text{C}$ ; в'язкість газу за робочих умов  $\mu=24,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; розрідження в циклоні  $p=8 \text{ кПа}$ ; запиленість газу що поступає на очищення  $z_1=6 \text{ г/м}^3$ ; густина пилу  $\rho_1=4000 \text{ кг/м}^3$ .

Дисперсний (фракційний) склад пилу:

крупність частинок, мкм	<5	5... 10	10...20	20...40	>40
масова доля, %	8	9	16	24	46

Розв'язок проводиться в наступному порядку.

Визначається густина газу за робочих умов:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot (p_n - p)}{(273 + t) \cdot p_a},$$

де  $p_n$  – тиск газу за нормальних умов,  $101325 \text{ Па}$ ;

$$\rho = 1,29 \frac{273 \cdot (101325 - 8000)}{(273 + 150) \cdot 101325} = 0,767 \text{ кг/м}^3.$$

Обчислюється витрата газу за робочих умов:

$$V = V_0 \frac{\rho_0}{3600 \cdot \rho} = 200000 \frac{1,29}{3600 \cdot 0,767} = 93,44 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Виходячи з властивостей агломераційного пилу приймається циклонний елемент діаметром  $D = 250$  мм з напрямним апаратом типу «розетка» з  $\alpha = 30^\circ$ . Оптимальна швидкість газу в циклонному елементі в цьому випадку становить 4,5 м/с, а витрата газу через один циклонний елемент складе:

$$V_1 = 4,5 \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} = 0,22 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Потрібна кількість циклонних елементів складе:

$$N = \frac{93,44}{0,22} = 424,73.$$

Беремо 400 циклонних елементів, тобто компонування з чотирьох груп по 100 циклонних елементів у кожній, з розміщенням по 10 елементів в кожному ряду. В цьому разі умовна швидкість газу в циклонних елементах складе:

$$w = \frac{93,44}{0,785 \cdot 0,25^2 \cdot 400} = 4,76 \text{ м/с}$$

Відхилення від оптимальної швидкості складе:

$$\Delta w = \frac{4,76 - 4,5}{4,5} \cdot 100 = 5,8\%,$$

тобто не виходить з рекомендованих границь  $\pm 15\%$ .

Гідравлічний опір батарейного циклона визначається по формулі (2.11):

$$\Delta p = 65 \frac{4,76^2}{2} \cdot 0,767 = 565 \text{ Па}.$$

В процесі експлуатації батарейних циклонів їх опір зростає через зношування напрямних апаратів та занесення їх пилом і, звичайно, в умовах агломераційного виробництва досягає 1,5÷2,0 кПа і більше.

Ступінь уловлювання пилу визначається наступним чином.

Обчислюється за формулою (2.18) розмір частинок, уловлюваних на 50% обраним циклонним елементом:

$$d_{50} = 5,0 \left( \frac{2200}{4000} \cdot \frac{24,1 \cdot 10^{-6}}{23,7 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{4,5}{4,76} \right)^{0,5} = 3,64 \text{ мкм}.$$

За заданим фракційним складом пилу будується інтегральна крива (рис.2.12), що показує відносний вміст частинок пилу з розмірами меншими за даний розмір.



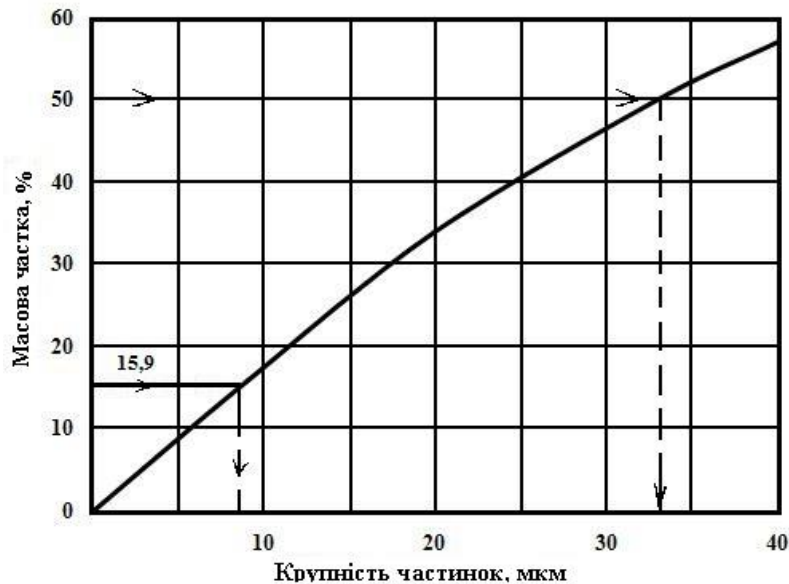


Рисунок 2.12 – Дисперсний (фракційний) склад пилу, представлений у вигляді інтегральної кривої

Для визначення значень  $d_m$  й  $d_{15,9}$  з точок, які відповідають 50% і 15,9% вмісту пилу, проводяться горизонтальні лінії до перетину з інтегральною кривою і з отриманих точок опускають перпендикуляри на вісь абсцис (пунктирні лінії).

Знайдені значення  $d_m=33$  мкм та  $d_{15,9}=9$  мкм дозволять визначити середньоквадратичне відхилення функції розподілу уловлюваних частинок пилу за формулою (2.17):

$$\lg \sigma_n = \lg \frac{33}{9} = \lg 3,666 = 0,5643$$

Після підстановки числових значень з табл. 2.2 у формулу (2.16), визначається значення  $x$ :

$$x = \frac{\lg 33 / 3,64}{(0,46^2 + 0,5643^2)^{0,5}} = \frac{0,9574}{(0,212 + 0,318)^{0,5}} = 1,315$$

Значення функції  $\Phi(x)$  по додатку А, яке відповідає  $x=1,315$ , дорівнює 0,905.

Ступінь вловлювання пилу складе:

$$\eta = 100 \cdot 0,905 = 90,5\%.$$

В процесі експлуатації батарейних циклонів із зазначених причин ступінь уловлювання пилу знижується, і в умовах агломераційного виробництва в більшості випадків знаходиться на рівні 80-85%.

### 3 АПАРАТИ МОКРОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ

Для підвищення ефективності очищення газу від дрібнодисперсного пилу використовують коагуляцію (укрупнення) частинок пилу. В апаратах мокрого очищення коагуляція досягається змочуванням пилу. При мокрому очищенні в запилений потік газу вводять рідину, зазвичай воду, яка змочує пил, що сприяє злипанню частинок пилу між собою, тобто укрупненню пилу.

При цьому, в результаті контакту газу з водою утворюється міжфазна поверхня «газ-рідина», на якій відбувається осадження коагульованого пилу. Форма поверхні осадження залежить від способу введення рідини і може бути у вигляді струменів, плівок, крапель та інше.

Вплив води на запилений газ може бути різноманітним, тобто не тільки очищення від пилу. У тому випадку, якщо очищається від пилу високотемпературний газ, вода охолоджує газ. При наявності шкідливих газоподібних компонентів в газі, наприклад,  $SO_2$  або  $SO_3$ , вода зв'язує ці компоненти з утворенням сірчаноокислотних з'єднань.

У число найбільш поширених апаратів мокрого очищення входять: зрошувані газоходи, промивні камери, скрубери, апарати ударно-інерційної дії, тарілчасті та швидкісні газопромивачі.

#### 3.1 Зрошувані газоходи

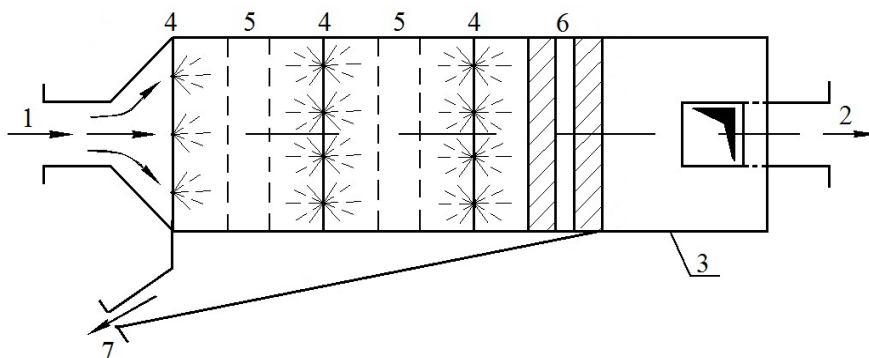
Вбудовані в зрошуваний газохід форсунки (див. рис. 3.1) створюють водяну завісу. Для виключення значного виносу води швидкість газу в газоході не повинна перевищувати 3 м/с. Питома витрата води – 0,1-0,3 кг/м<sup>3</sup>.



Рисунок 3.1 – Схема зрошуваного газоходу

### 3.2 Промивні камери

Промивні камери зазвичай застосовують для очищення повітря від пилу в системах вентиляції та кондиціонування повітря (див. рис. 3.2).



1 – підвід запиленого газу; 2 – відвід очищеного газу; 3 – корпус камери; 4 – форсункові ряди для створення водяних завіс; 5 – сітки або перфоровані листи для рівномірного руху газу; 6 – краплеуловлювач у вигляді жалюзійних решіток; 7 – відвід шламу.

Рисунок 3.2 – Схема промивної камери

Розміри камери вибирають таким чином, щоб швидкість руху газів  $w_{\Gamma}$  становила в них  $1,5 \div 2,5$  м/с, а час перебування газів в камері  $\tau_{\Gamma}$  не менше 3 с. Заданий час перебування газу  $\tau_{\Gamma}$  і швидкість газу  $w_{\Gamma}$  визначають довжину камери  $L_{\kappa}$  і площу її поперечного перерізу  $S_{\kappa}$ :

$$L_{\kappa} = \tau_{\Gamma} \cdot w_{\Gamma}, \quad S_{\kappa} = V_{\Gamma} / w_{\Gamma}, \quad (3.1, 3.2)$$

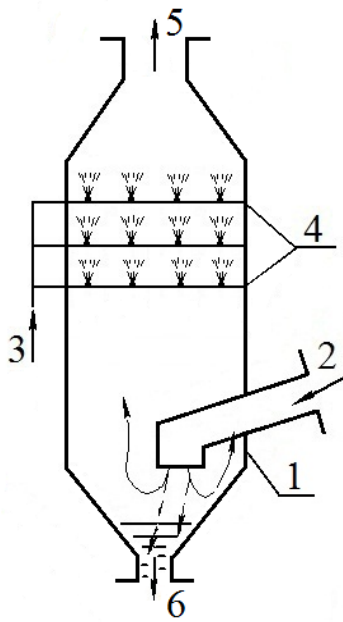
де  $V_{\Gamma}$  – витрата очищуваного газу.

Питома витрата води –  $0,2 \div 1,0$  кг/м<sup>3</sup>.

### 3.3 Скрубери

Скрубери поділяють на порожнисті і насадкові. На рисунку 3.3 представлена схема порожнистого скрубера.

У металургійному виробництві це вертикальні порожнисті циліндри діаметром до 6-8 м, висотою до 20-30 м.



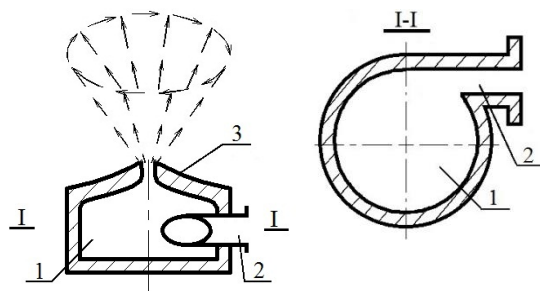
- 1 – циліндричний корпус;
- 2 – підвід запиленого газу;
- 3 – підведення води на зрошення;
- 4 – яруси зрошуючих форсунок;
- 5 – відвід очищеного газу;
- 6 – відвід шламу.

*Рисунок 3.3 – Схема порожнистого скрубера*

Патрубок для підведення запиленого газу дещо зміщений від осі скрубера, що покращує рівномірність розподілу газу. Отвір підвідного патрубка направлено до дзеркала води, що забезпечує ударний контакт газу з водою. В результаті удару газу о воду відбувається інерційне відділення найбільш великих часток пилу.

Форсунки зазвичай розміщуються в декілька ярусів. Факел розпилювання води з форсунки може бути направлений вгору, вниз або під кутом.

Найбільш поширеною конструкцією форсунок є відцентрові форсунки (див. рис. 3.4).



- 1 – вихрова камера;
- 2 – тангенціальний підвід води;
- 3 – сопло.

*Рисунок 3.4 – Відцентрова форсунка*

З відцентрової форсунки вода виходить з сопла у вигляді обертового порожнистого конуса, який під дією відцентрових сил розпадається на окремі краплі. Питома витрата води на очищення залежить від запиленості газу і може скласти, наприклад, до 6-8 кг води на 1 м<sup>3</sup> при запиленості 10-12 г/м<sup>3</sup>.

У скрубери відбувається також охолодження газу, якщо газ надходить на очищення високотемпературний. Максимально допустима температура газу на вході в скрубери – 300<sup>0</sup>С. При більш високій температурі газу інтенсивне випаровування води виключає або знижує ефект коагуляції пилу.

Швидкість газу в скрубєрі приймають в межах  $0,5 \div 1,5$  м/с. При більш високій швидкості відбувається винос крапель, що призводить до відкладення шламу в наступних за скрубєром газоходах. При менш високих швидкостях газу зростають розміри скрубєра і декілька знижується ефективність очищення внаслідок зменшення турбулізації потоку газу, яка сприяє кращому перемішуванню газу з водою.

За заданої швидкості газу в скрубєрі  $w_T$  визначається діаметр скрубєра  $D_c$ :

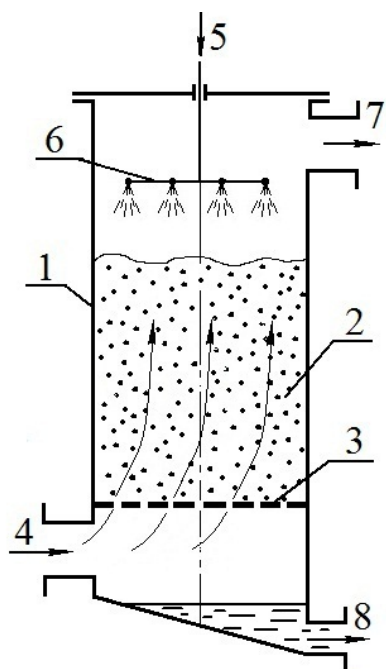
$$D_c = \sqrt{V_T / (0,785 \cdot w_T)}, \quad (3.3)$$

Оптимальне співвідношення висоти і діаметра скрубєра:  $H_c / D_c = 2,5$ .

Порожнисті скрубєри забезпечують досить високий ступінь очищення (понад 80%) при уловлюванні частинок розміром більше 10 мкм і малоефективні при уловлюванні частинок менше 5 мкм.

Внутрішню поверхню скрубєра для виключення корозії (наприклад, сірчаноокислотної) облицьовують керамічною плиткою.

*Насадкові скрубєри* представляють собою порожнисті циліндри заповнені насадкою (див. рис. 3.5). Насадка засипається без певного порядку або укладається на опорну решітку в певному порядку (регулярна насадка).



1 – корпус скрубєра; 2 – насадка; 3 – опорна решітка; 4 – вхід запиленого газу; 5 – подача води на зрошення; 6 – ярус форсунок, що зрошують; 7 – вихід очищеного газу; 8 – відвід шламу.

*Рисунок 3.5 – Схема насадкового скрубєра*

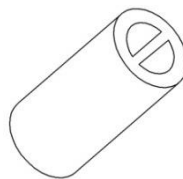
Насадкові скрубєри широко застосовуються в хімічній промисловості для очищення газів від добре розчинного пилу і туманів. Уловлювання пилу супроводжується охолодженням газів і адсорбцією певних компонентів газу.

Застосовуються різні типи насадок:

кільця Рашига,



кільця з перегородкою та ін.



Швидкість газу в насадкових скруберах становить  $1,5 \div 2,5$  м/с.

У металургії застосовують скрубери з хордовою насадкою. Хордова насадка являє собою дерев'яні бруси товщиною 10-15 мм і шириною 100-150 мм. Витрата води –  $1,2 \div 2,5$  кг/м<sup>3</sup>. Співвідношення висоти насадки  $H_n$  і діаметра насадки скрубера  $D_n$  приймається в межах  $0,5 \div 1,5$ .

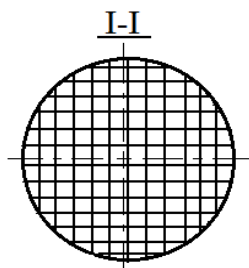
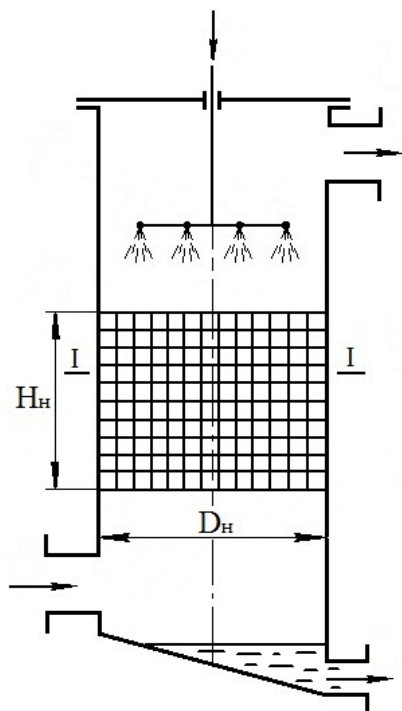


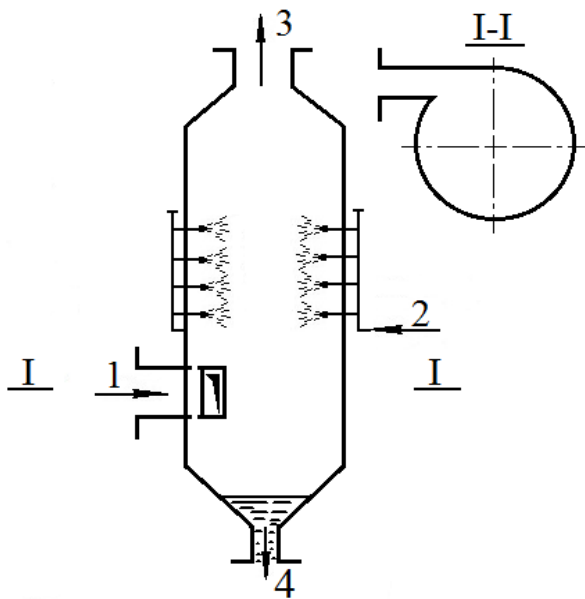
Рисунок 3.6 – Скрубер с хордовой насадкою

$H_n$  і  $D_n$  – висота та діаметр насадки

Застосування в техніці пилоуловлювання насадкових скруберів обмежено через часте забивання насадки пилом.

Ефективність очищення в насадкових скруберах може скласти до 90% при уловлюванні частинок понад 2 мкм.

У відцентрових скруберах (див. рис. 3.7) досягається комбінована дія при уловлюванні пилу: коагуляція пилу водою та дія на пил відцентрових сил у закрученому потоці газу.



1 – тангенціальний підвід запиленого газу; 2 – підведення води на форсункове зрошення; 3 – відвід очищеного газу; 4 – відвід шламу.

Рисунок 3.7– Відцентровий скруббер

Форсунки розміщуються вздовж стінок скрубера. Над форсунками передбачається зона вільна від подачі води. Це дає можливість відкинути краплі зрошення на стінки скрубера перш ніж газовий потік досягне вихідного патрубка.

Швидкість газу на вході в скруббер становить  $20 \div 60$  м/с. Швидкість газів, що потребують очищення, в перетині скрубера складає  $1,2 \div 2,4$  м/с, питома витрата води на очищення –  $0,4 \div 1,3$  кг/м<sup>3</sup>.

Ступінь очищення газів для частинок понад 1 мкм може скласти більше 97%.

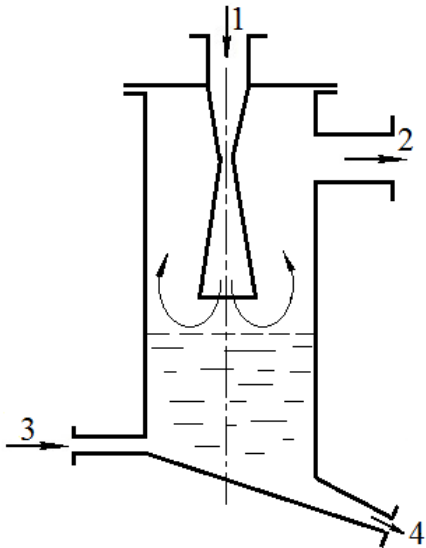
Високий ступінь очищення газу досягається внаслідок багаторазової промивки газу водою в обертовому потоці.

У відцентрових скруберах одночасно з очищенням газу від пилу та охолодженням газу відбувається абсорбція з газів оксидів сірки. Ступінь уловлювання оксидів сірки може скласти до 40-50%.

### 3.4 Апарати ударно-інерційної дії

До апаратів ударно-інерційної дії відноситься група мокрих пилоуловлювачів, в яких газовий потік ударяється об поверхню рідини на великій швидкості, що призводить до часткового вилучення пилу в результаті поглиблення пилу в рідину, а потім газовий потік різко змінює напрямок руху, що призводить до видалення пилу внаслідок дії на частки інерційних сил.

Найбільш простою конструкцією пилоуловлювача ударно-інерційної дії є вертикальна колона (див. рис. 3.8), у верхній частині якої встановлено центральний вхідний газохід, який має конфігурацію труби Вентурі, а в нижній частині колона заповнена водою.



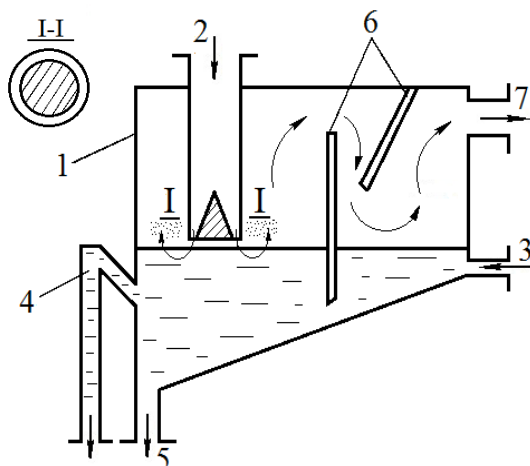
1 – підвід запиленого газу; 2 – відвід очищеного газу; 3 – підведення води; 4 – відвід шламу.

*Рисунок 3.8 – Ударно-інерційний пилоуловлювач з центральним верхнім підведенням газу*

Швидкість очищуваного газу спрямованого на поверхню води становить до 20-30 м/с. При ударі газу о воду великі частки пилу заглиблюються в воду, змочуються та випадають на днище апарату у вигляді шламу. Після удару об воду напрямок руху газу змінюється на  $180^{\circ}$ .

При повороті газу на  $180^{\circ}$  частинки пилу, що залишилися в газі, внаслідок інерції відокремлюються від газу і також уловлюються водою. Апарат уловлює частинки більше 20 мкм. Шлам з апарату видаляється безперервно або періодично. Для видалення ущільненого шламу з дна застосовують змивні сопла.

За кордоном в числі апаратів ударно-інерційної дії найбільш поширений скруббер Дойля (див. рис. 3.9).



1 – корпус скруббера; 2 – підвід запиленого газу; 3 – підведення води в порожнину скруббера; 4 – перелив для відводу надлишку води; 5 – відвід шламу; 6 – перегородки для видалення крапель; 7 – відведення очищеного газу.

*Рисунок 3.9 – Скруббер Дойля*



Скрубер Дойля являє собою заповнений водою резервуар. Підвід запиленого газу здійснюється через вертикальну трубу. В нижній частині труби встановлено конус, що створює звужуючий кільцевий зазор для виходу газу. Це прискорює потік запиленого газу перед контактом з водою.

Перелив для відведення надлишку води виконує функцію гідрозатвору. Перегородки, які розміщені в порожнині скрубера, забезпечують багаторазову зміну напрямку руху газу при виході його з скрубера. Це сприяє інерційному відділенню крапель вологи, що уносятся з пилоуловлювача. Перегородки можуть бути виконані перфорованими або у вигляді жалюзі.

У щілини кільцевого зазору на виході з труби швидкість газу складає до 35-55 м/с. Газовий потік ударяється об поверхню рідини, створюючи завісу з крапель рідини.

Ударно-інерційне проникнення пилу вглиб води, а також коагуляція пилу в крапельній завісі забезпечують уловлювання пилу.

Зазор між нижнім перерізом труби і рівнем води в скрубери в статичному стані становить 2-3 мм. Питома витрата води на очищення –  $0,1 \div 0,2$  кг/м<sup>3</sup>. В скрубери ефективно уловлюються частинки більше 10-15 мкм.

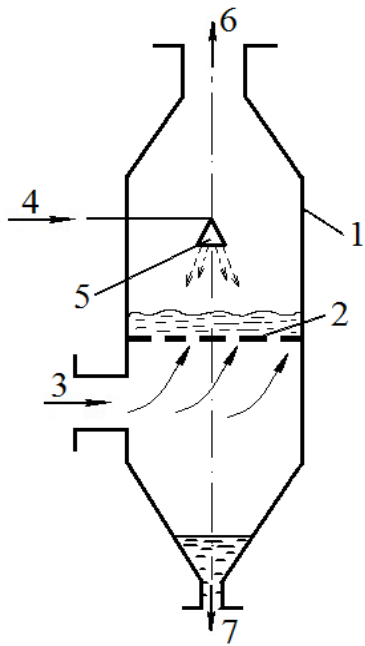
Особливістю апаратів ударно-інерційної дії є відсутність пристроїв для переміщення води. Необхідна для очищення розвинена поверхня контакту газу та води створюється за рахунок енергії газу який вдаряється об воду. У зв'язку з цим пилоуловлювачі ударно-інерційної дії називають *апаратами з внутрішньою циркуляцією рідини*.

### 3.5 Тарілчасті газопромивачі

Тарілчасті газопромивачі є вертикальними порожнистими циліндрами (див.рис.3.10), всередині яких встановлені горизонтальні перегородки з отворами (тарілки).

Тарілчасті газопромивачі залежно від конструкції тарілки розділяються на дві групи:

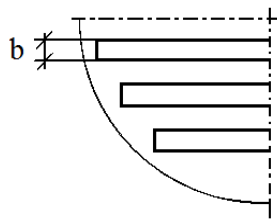
- 1) з *провальними* тарілками;
- 2) з *переливними* тарілками.



1 – корпус газопромивача; 2 – провальна тарілка; 3 – підведення запиленого газу; 4 – подача води на зрошення; 5 – зрошувальний пристрій; 6 – вихід очищеного газу; 7 – відвід шламу.

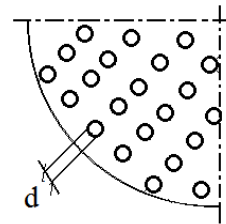
Рисунок 3.10 – Схема газопромивача з провальними тарілками

Підвід газу в зону контакту з рідиною здійснюється через отвори в тарілці, які можуть бути щілинними або дірчастими (круглими):



щілинні тарілки

$b=4-5$  мм



дірчасті тарілки

$d=4-8$  мм

Оптимальна товщина тарілки з точки зору гідравлічного опору 4-6 мм.

Залежно від швидкості газу можливі три режими роботи тарілчастого газопромивача:

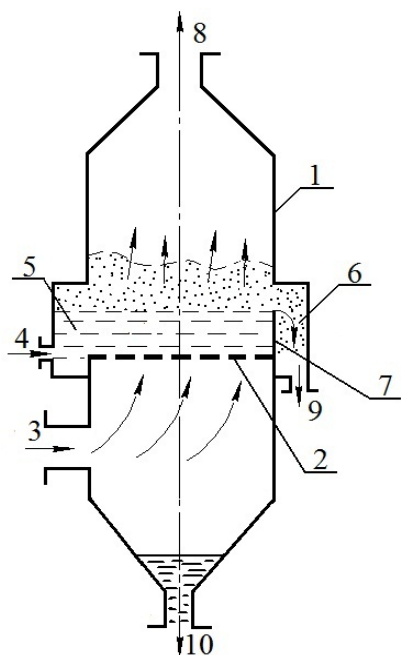
- *барботажний*, при якому газ проникає в шар рідини у вигляді бульбашок (швидкість газу до 1 м/с);
- *пінний*, при якому утворюється високотурбулізована піна (швидкість газу понад 1,2 м/с);
- *хвильовий*, при якому газ проходить через шар води струменями (швидкість газу понад 2,0 м/с).

*Барботажний* режим унаслідок невеликих швидкостей газу, що знижує продуктивність газопромивача, має обмежене застосування. В барботажному режимі ускладнено також видалення шламу з решітки, що створює складності при експлуатації пилоуловлювача (засмічення решітки шламом, збільшення гідравлічного опору апарату та ін.).

У *пінному* режимі відбувається безперервне утворення, руйнування і злиття бульбашок, що інтенсифікує уловлювання пилу і сприяє внаслідок турбулізованому стану піни динамічному змиттю шламу з решітки. Тарілчасті пилоуловлювачі, що працюють в пінному режимі, називають також пінні газопромивачі. В пінних тарілчастих пилоуловлювачах можливо ефективно уловлювання частинок більше 2 мкм. Витрата води складає  $0,4 \div 0,9 \text{ кг/м}^3$ .

Для *хвильового* режиму характерна гідравлічна нестабільність роботи апарату: прорив газу через шар води на решітці, порушення сходу шламу через решітку, збільшення шару води, що підвищує гідравлічний опір, підвищений краплеунос та ін.

В пилоуловлювачах з переливними тарілками (див. рис. 3.11) зазвичай встановлюють дірчасті тарілки з діаметром отворів  $2 \div 8 \text{ мм}$ . Швидкість газу у вільному перерізі апарату  $1 \div 3 \text{ м/с}$ . Основний режим роботи газопромивача з переливними тарілками – пінний.



1 – корпус газопромивача; 2 – тарілка; 3 – подача запиленого газу; 4 – подача води; 5 – приймальна камера; 6 – зливна камера; 7 – поріг регулюючий рівень води на тарілці; 8 – вихід очищеного газу; 9 і 10 – відвід шламу.

*Рисунок 3.11 – Схема газопромивача з переливними тарілками*

Перелив води завдяки відносно безпровальному режиму руху води дозволяє більш раціонально використовувати воду за рахунок зниження втрат води зі шламом і в 2-3 рази скоротити витрату води на газоочищення порівняно з провальними тарілками.

Недоліками газопромивача з переливними тарілками є утворення відкладень на поверхні тарілок внаслідок менш інтенсивного переміщення води на поверхні тарілки і бризкоунос внаслідок пінного режиму роботи, що обмежує застосування газопромивача з переливними тарілками.

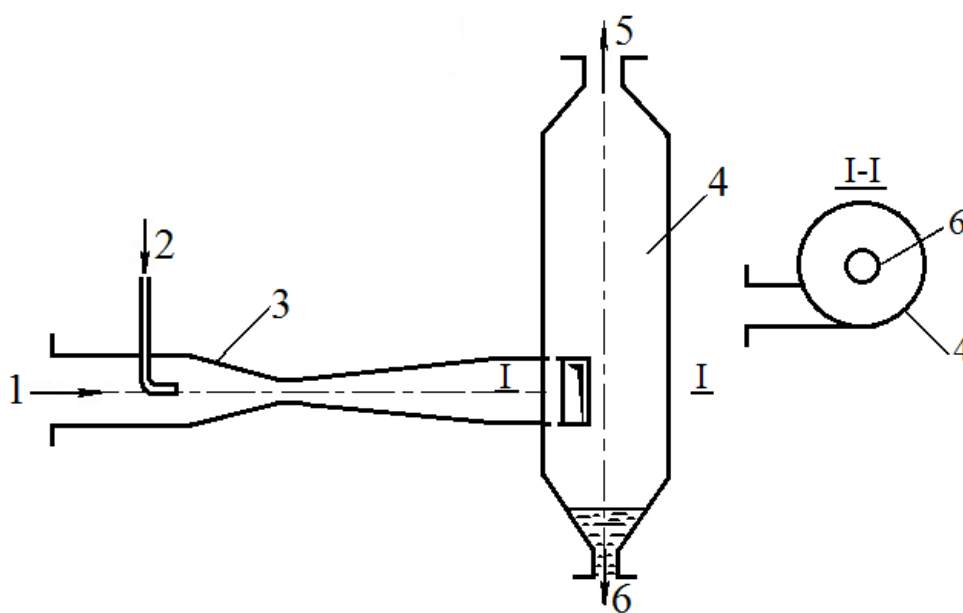
### 3.6 Швидкісні газопромивачі

Швидкісні газопромивачі – найбільш ефективні апарати мокрого очищення газу, їх застосовують переважно для очищення газу від мікронного і субмікронного пилу (десяті частки мкм).

В швидкісних газопромивачах основним фактором, що забезпечує очищення газу, є подача води на очищення у високошвидкісний потік запиленого газу. Це сприяє ретельному диспергуванню води і подальшому промиванні газу водою в турбулентному режимі руху газу. Високі швидкості очищуваного газу забезпечують труби Вентурі. У зв'язку з цим швидкісні газопромивачі також називають скруберами Вентурі.

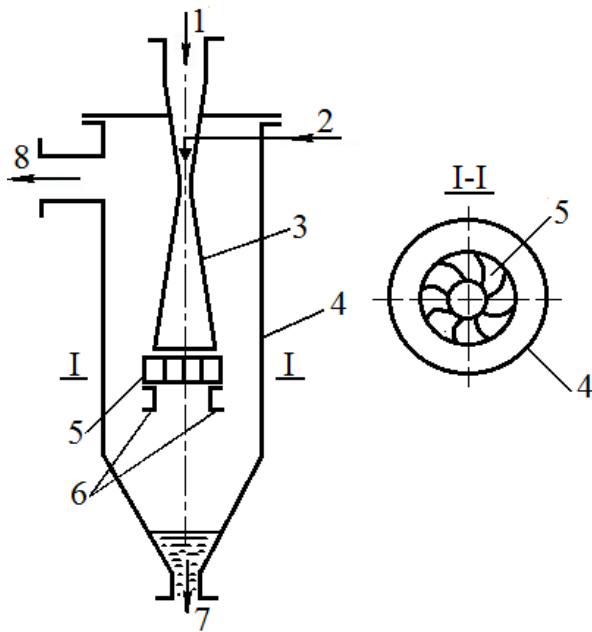
В цілому скрубери Вентурі представляють собою поєднання труб Вентурі і наступних за трубами краплеуловлювачів. Вода надходить в найбільш швидкісну частину труб Вентурі (в конфузур або горловину).

Елементи скрубера можуть бути змонтовані роздільно (див.рис.3.12) або в одному корпусі (див. рис. 3.13).



1 – вхід запиленого газу; 2 – підвід зрошувальної рідини; 3 – труба Вентурі; 4 – циклон-краплеуловлювач; 5 – відвід очищеного газу; 6 – відвід шламу.

*Рисунок 3.12 – Скрубер Вентурі з виносним краплеуловлювачем*



1 – підвід запиленого газу; 2 – підвід зрошувальної рідини; 3 – труба Вентурі; 4 – корпус краплеуловлювача; 5 – відцентровий завихрювач; 6 – патрубок для концентрації шламу; 7 – відвід шламу; 8 – вихід очищеного газу.

*Рисунок 3.13 – Скрубер Вентурі з вбудованим краплеуловлювачем*

Таким чином, принцип дії скрубера Вентурі полягає в інтенсивному дробленні рідини, що подається на очищення газу у високошвидкісний газовий потік ( $40 \div 150$  м/с), в коагуляції пилу рідиною в турбулентному режимі руху газу і наступному уловлюванні крапель рідини, що утворюють з пилом шлам.

Застосування труби Вентурі для прискорення газу дозволяє зробити процес дроблення рідини з мінімальними гідравлічними втратами.



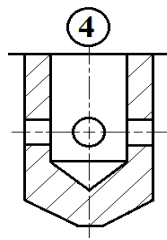
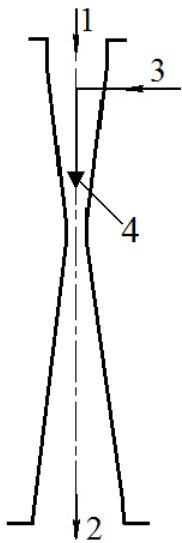
Плавне звуження конфузора (оптимальне  $25 \div 28^\circ$ ), а потім плавне розширення дифузора (оптимальне  $6 \div 7^\circ$ ) роблять трубу Вентурі з аеродинамічної точки зору найбільш кращою для розпилювання зрошувальної води.

У конфузорі газ розвиває велику швидкість, що сприяє дробленню води на найдрібніші краплі. В дифузорі внаслідок зниження швидкості відбувається укрупнення крапель води з пилом, що полегшує їх відділення у краплеуловлювачі.

В якості краплеуловлювача зазвичай використовують найпростіші апарати інерційного типу або циклони.

Різноманітність в конструкції скрубера Вентурі вносить спосіб підведення зрошувальної води. Можливі такі варіанти:

### 1. Скрубер Вентурі з центральним підведенням води



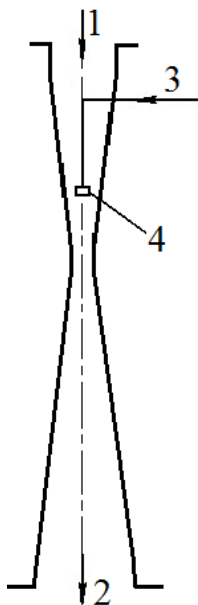
1 і 2 – підвід і відвід очищеного газу; 3 – підведення води на зрошення; 4 – наконечник для струменевої подачі зрошувальної води.

Розташування наконечника, кількість отворів в ньому і діаметр отворів конструктивно приймаються таким чином, щоб виключити вдарення струменя зрошувальної води об стінки конфузора, оскільки в іншому випадку різко погіршується розпилювання води газовим потоком.

Для більш рівномірного розподілу води в наконечнику можуть бути два ряди отворів. Діаметри отворів від 6 мм до 8-12 мм. Питома витрата води  $0,5 \div 1,0$  кг/м<sup>3</sup> газу.

Недоліком подачі води через наконечники є забивання отворів, тому що в більшості випадків для зрошення застосовується вода оборотного циклу, що містить суспензії.

### 2. Скрубер Вентурі з форсунковим підведенням води



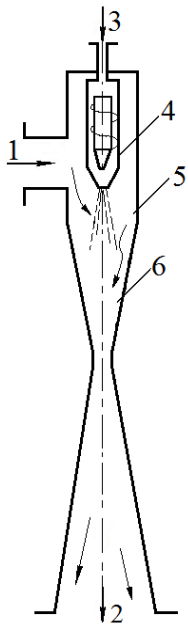
1 і 2 – підвід і відвід очищеного газу; 3 – підведення води на зрошення; 4 – форсунка.

Форсунку розміщують перед конфузром або безпосередньо в конфузори. Зазвичай застосовують відцентрові форсунки. Тиск води перед форсунками  $0,2 \div 0,3$  МПа.

При більш високому тиску води перед форсункою відчутніше стає ефект ежекції від струменів зрошувальної води, тобто створення розрядження в порожнині конфузора труби Вентурі.

### 3. Ежекторний скруббер Вентурі

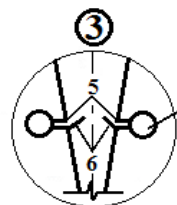
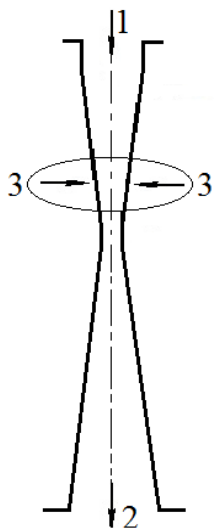
Подача води під більш високим тиском і супутній цьому ефект ежекції використовується в ежекторних скруберах Вентурі, які можна віднести до різновиду скрубера Вентурі з форсунковим підведенням води.



1 і 2 – підвід і відвід очищеного газу; 3 – підведення води на зрошення; 4 – відцентрова форсунка з гвинтовим завихрювачем; 5 – приймальна камера; 6 – труба Вентурі.

В ежекторних скруберах Вентурі основна енергія, що витрачається на очищення газу, підводиться зі зрошувальною рідиною, що забезпечує за рахунок ежекції рух очищеного газу. Тиск нагнітання води в цих скруберах становить  $0,4 \div 1,2$  МПа, а швидкість витікання води  $15 \div 30$  м/с.

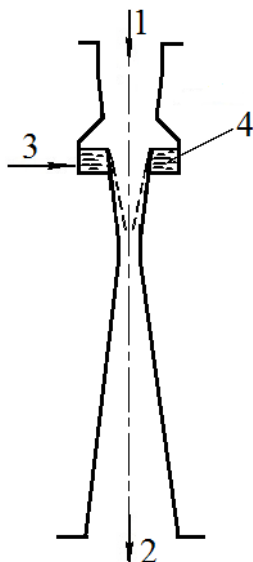
#### 4. Скрубер Вентурі з периферійною подачею води



1 і 2 – підвід і відвід очищеного газу;  
3 – подача води на зрошення; 4 – колектор;  
5 – отвори; 6 – відбивні пластини.

Струмені води, що витікають з отворів колектора зрізаються о кромки відбивних пластин і стають плоскими. Це збільшує площу поперечного перерізу горловини, що зрошується водою.

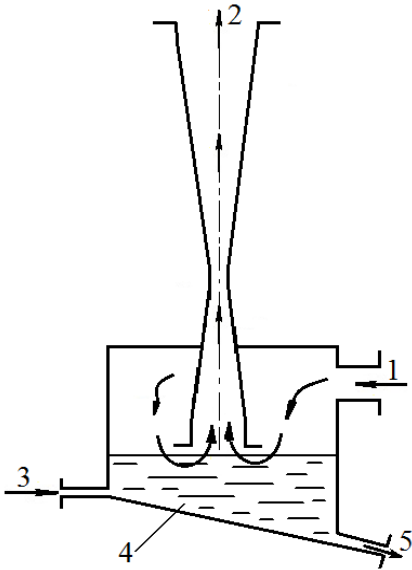
#### 5. Скрубер Вентурі з плівковим зрошенням



1 і 2 – підвід і відвід очищеного газу; 3 – підведення води на зрошення; 4 – камера зрошувальної води.

Плівкове зрошення за рахунок безперервного змиву водою зменшує утворення відкладень на стінках дифузора труби Вентурі. Плівкове зрошення доцільно при недостатньо освітленій оборотній воді, застосування якої небажано, наприклад, при форсунковому підводі води через забивання отворів форсунки.

## 6. Скрубер Вентурі з безфорсунковим підведенням води



1 і 2 – підвід і відвід очищеного газу; 3 – підведення води на зрошення; 4 – резервуар зрошувальної води; 5 – відвід шламу.

При безфорсунковому підводі води зрошення відбувається за рахунок енергії газового потоку.

Газ, що подається на очищення, в результаті контакту з поверхнею води в резервуарі захоплює краплі води і забирає їх у трубу Вентурі.

Гідравлічний опір труби Вентурі при безфорсунковому зрошенні нижче, ніж при центральному та форсунковому зрошенні. Разом з цим при безфорсунковому зрошенні відбувається менше дроблення води, що призводить до менш ефективного очищення газу від пилу.

У донній частини резервуара зі зрошувальною водою передбачено періодичне відведення шламу, тому що контакт газу з поверхнею води та деяке поглиблення запиленого газу можуть викликати захоплення пилу водою.

Залежно від гідравлічного опору скрубери Вентурі можна розділити на:

- *високонапірні* (20÷30 кПа), які застосовують для тонкого очищення газу від мікронного та субмікронного пилу;
- *низьконапірні* (3÷5 кПа), які застосовують для підготовки очищеного газу перед наступним пилоуловлювачем другого ступеня очищення.

Ступінь очищення газу залежить від гідравлічного опору труби Вентурі: чим більше гідравлічний опір, тим вище ступінь очищення. Збільшення гідравлічного опору забезпечує збільшення стрибка тиску в газовому потоці очищеного, що сприяє диспергуванню зрошувальної рідини, інтенсифікує турбулізацію газового потоку та в цілому активізує промивку газу.

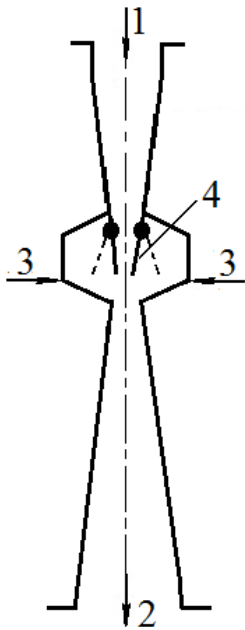
У тому випадку, якщо кількість газів, що підлягають очищенню, змінюється, для стабілізації ефективності очищення слід підтримувати постійний гідравлічний опір труби Вентурі.

Підтримання опору труби Вентурі на постійному рівні при зміні кількості газу досягається регулюванням площі поперечного перерізу горловини труби Вентурі.



Слід виділити дві конструкції труб Вентурі з регульованим перерізом горловини:

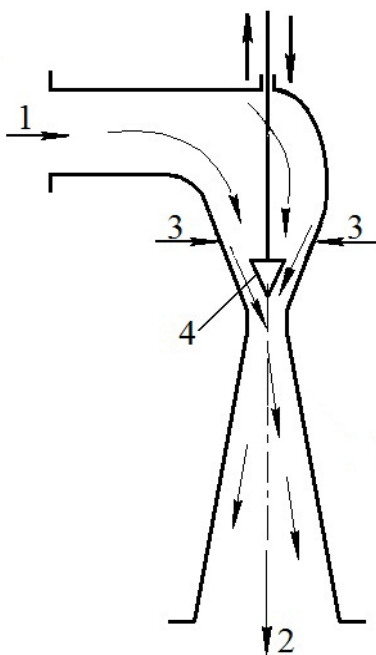
1. Регулювання перерізу за допомогою поворотних заслінок



1 і 2 – підвід та відведення очищеного газу; 3 – підведення зрошувальної води; 4 – поворотні заслінки.

Регулювання перерізу за допомогою поворотних заслінок застосовується для труб Вентурі прямокутного перерізу.

2. Регулювання перерізу переміщенням конусу



1 і 2 – підвід та відведення очищеного газу; 3 – подача води на зрошення; 4 – регулюючий конус.

На практиці віддають перевагу регулюючому конусу порівняно з поворотними заслінками, тому що при регулюванні конусом механізм переміщення винесено із зони дії запиленого потоку.

В цілому ефективність роботи скрубєрів Вентурі визначається оптимальним співвідношенням між гідравлічним опором та питомою витратою зрошувальної рідини. Оптимальне співвідношення залежить від конструкції скрубєра, характеристики частинок пилу та їх дисперсного складу.

Загалом кількість зрошувальної рідини для скрубєрів Вентурі в залежності від особливостей конструкції скрубєра становить  $0,5 \div 1,5 \text{ кг/м}^3$ .

### 3.7 Розрахунок скрубера Вентурі

#### 3.7.1 Методика розрахунку

У розрахунку скруберів Вентурі віддають перевагу енергетичному методу, згідно з яким ефективність роботи мокрих пилоуловлювачів визначається затратами енергії на процес очищення газу. Затрати енергії складаються з гідравлічного опору апарату  $\Delta p_{an}$  й тиску розпилюваної рідини на вході в апарат  $\Delta p_p$ :

$$K = \Delta p_{an} + m \cdot p_p, \quad (3.4)$$

де  $m$  – питома витрата зрошувальної рідини,  $\text{кг}/\text{м}^3$  газу.

Ступінь уловлювання пилу в залежності від витрат енергії на очищення визначається за формулою:

$$\eta = 1 - \exp(-B_1 \cdot K^x), \quad (3.5)$$

де  $B_1$  і  $x$  – константи, що залежать від властивостей уловлюваного пилу (див. табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Значення констант  $B_1$  і  $x$  для деяких видів пилу металургійного виробництва

Пил відхідних газів	$B_1$	$x$
доменних печей	$6,61 \cdot 10^{-3}$	0,891
мартенівських печей	$1,57 \cdot 10^{-6}$	1,619
сталеплавильних конверторів	$9,88 \cdot 10^{-2}$	0,466
електросталеплавильних печей	$2,42 \cdot 10^{-5}$	1,260
вапнякових печей	$6,50 \cdot 10^{-4}$	0,053

Основні положення розрахунку скрубера Вентурі:

1. За заданими початкової  $z_1$  та кінцевої  $z_2$  запиленості газу визначається потрібна ступінь уловлювання пилу:

$$\eta = \frac{z_1 - z_2}{z_1}. \quad (3.6)$$

2. Згідно зі значенням  $\eta$  і прийнятими значеннями  $B_1$  й  $x$  (див. табл. 3.1) з виразу (3.5) обчислюється значення  $K$ :

$$K = \sqrt{x \cdot \frac{1}{B_1} \cdot \ln(1 - \eta)}. \quad (3.7)$$

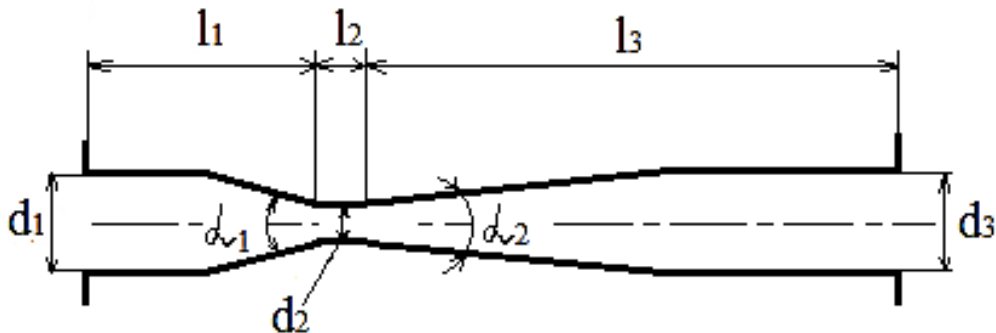
3. Приймається питома витрата зрошувальної рідини  $m$  і відповідно до виразу (3.4) визначається гідравлічний опір скрубера Вентурі:

$$\Delta p_{an} = K - m \cdot p_p. \quad (3.8)$$

4. Визначається гідравлічний опір краплеуловлювача  $\Delta p_k$  (зазвичай по дослідним даним) і обчислюється гідравлічний опір труби Вентурі:

$$\Delta p_{tr} = \Delta p_{an} - \Delta p_k. \quad (3.9)$$

5. Приймають позначення конструктивних характеристик труби Вентурі:



- $d_1, l_1, \alpha_1$  – діаметр вхідного перерізу, довжина та кут звуження конфузора;

- $d_2, l_2$  – еквівалентний діаметр і довжина горловини;

- $d_3, l_3, \alpha_2$  – діаметр вихідного перерізу, довжина і кут розкриття дифузора.

6. Визначаються або приймаються значення коефіцієнта гідравлічного опору сухої (без подачі зрошувальної рідини) труби Вентурі  $\xi_1$  і коефіцієнта, що враховує додаткові втрати тиску, викликані подачею в трубу зрошувальної рідини  $\xi_2$ .

При оптимальній з аеродинамічного погляду довжині горловини труби-розпилювача  $l_2 = 0,15 \cdot d_2$  коефіцієнт опору  $\xi_1$  приймається в межах  $0,12 \div 0,15$ . Ці значення  $\xi_1$  можуть бути поширені як на круглі труби, так і на труби з прямокутним перерізом горловини.

Коефіцієнт опору труби Вентурі, зумовлений уведенням зрошувальної рідини, визначається виразом:

$$\xi_2 = A \cdot \xi_1 \cdot m^{B_2}, \quad (3.10)$$

де  $A$  і  $B_2$  – емпіричні коефіцієнти, значення яких наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнтів  $A$  і  $B_2$  у формулі (3.10)

Спосіб зрошення труби Вентурі	Швидкість газу в горловині, м/с	довжина горловини $l_2$ , м	Коефіцієнти	
			$A$	$B_2$
центральне зрошення перед конфузозом і плівкове зрошення	>80	$(0,15-12,0)d_2$	$1,68(l_2/d_2)^{0,290}$	$1-1,12(l_2/d_2)^{-0,045}$
	<80	$0,15d_2$	$3,49(l_2/d_2)^{0,266}$	$1-0,98(l_2/d_2)^{0,020}$
центральне зрошення в конфузозор	$40 \div 150$	$0,15d_2$	0,63	-0,3
периферійне зрошення в конфузозор	>80	$0,15d_2$	13,4	0,024
	<80	$0,15d_2$	1,4	-0,316

7. Обчислюється швидкість газу в горловині труби Вентурі, м/с

$$u_r = \left( \frac{2 \cdot \Delta p_{\text{тр}}}{(\xi_1 \cdot \rho_r) + (\xi_2 \cdot m \cdot \rho_p)} \right)^{0,5}, \quad (3.11)$$

де  $\rho_r$  і  $\rho_p$  – відповідно густина очищеного газу та зрошувальної рідини, кг/м<sup>3</sup>.

8. Визначається діаметр горловини труби Вентурі, м

$$d_2 = 1,13 \cdot \left( \frac{V}{u_r} \right)^{0,5}, \quad (3.12)$$

де  $V$  – витрата очищеного газу за робочих умов, м<sup>3</sup>/с; 1,13 – коефіцієнт, який замінює  $\sqrt{4/\pi}$ .

9. Приймаються оптимальними наступні конструктивні співвідношення труби Вентурі:

- кут звуження конфузора  $\alpha_1=25\div 28^\circ$ ;
- довжина конфузора  $l_1 = [(d_1 - d_2)/2] \cdot \text{tg}(\alpha_1/2)$ ;
- довжина горловини труби  $l_1 = 0,15 \cdot d_2$ ;
- кут розкриття дифузора  $\alpha_2=6\div 7^\circ$ ;
- довжина дифузора  $l_3 = [(d_3 - d_2)/2] \cdot \text{tg}(\alpha_2/2)$ .

### 3.7.2. Приклад розрахунку

Розрахувати скруббер Вентурі для очищення відхідних газів мартенівської печі: визначити розміри скруббера, ефективність і гідравлічний опір.

#### Вихідні дані:

- витрата вологих газів за нормальних умов –  $V_0=150000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- температура газів на вході в скруббер –  $t_1=200^\circ\text{C}$ ;
- розрідження газу перед скруббером –  $p_r=5 \text{ кПа}$ ;
- густина газу за нормальних умов –  $\rho_0=1,29 \text{ кг/м}^3$ ;
- концентрація пилу в газі на вході в скруббер –  $z_1=5 \text{ г/м}^3$ ;
- напір води, що надходить на зрошення –  $p_p=300 \text{ кПа}$ ;
- необхідна концентрація пилу в газі на виході з скруббера –  $z_2=100 \text{ мг/м}^3$ .

За формулою (3.6) визначається необхідний ступінь очищення газу:

$$\eta = \frac{z_1 - z_2}{z_1};$$

$$\eta = \frac{5 - 0,1}{5} = 0,98.$$

За формулою (3.7) з урахуванням коефіцієнтів  $B_1$  і  $x$ , прийнятих по табл.3.1, обчислюються витрати енергії на очищення газу:

$$K = \sqrt{x \cdot \left( -\frac{1}{B_1} \cdot \ln(1 - \eta) \right)};$$

$$K = \sqrt{1,619 \cdot \left( -\frac{1}{1,57 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln(1 - 0,98) \right)} = 8928 \text{ кДж/1000 м}^3 \text{ газу.}$$

Загальний гідравлічний опір скруббера Вентурі визначається за формулою (3.8), в якій питома витрата зрошувальної рідини  $m$  прийнята  $0,001 \text{ м}^3/\text{м}^3$  газу:

$$\Delta p_{\text{ан}} = K - m \cdot p_p;$$

$$\Delta p_{\text{ан}} = 8928 - 0,001 \cdot 300000 = 8628 \text{ Па.}$$

Густина газу з урахуванням дійсних умов складе:

$$\rho_d = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot (101,3 - p_r)}{(273 + t_1) \cdot 101,3} = 1,29 \cdot \frac{273 \cdot (101,3 - 5)}{(273 + 200) \cdot 101,3} = 0,71 \text{ кг/м}^3,$$

де 101,3 – тиск газу за нормальних умов, кПа

Об'ємна витрата газу, що надходить на очищення за дійсних умов:

$$V_d = V_0 \cdot \frac{\rho_0}{\rho_d} = 150000 \cdot \frac{1,29}{0,71} = 273000 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Витрата зрошувальної рідини (води):

$$M = m \cdot V_d = 0,001 \cdot 273000 = 273 \text{ кг/ч}.$$

Гідравлічний опір циклона-краплеуловлювача  $\Delta p_k$  на основі досвіду роботи аналогічних установок приймається 100 Па.

Гідравлічний опір труби Вентурі визначаємо за формулою (3.9):

$$\Delta p_{тр} = \Delta p_{ан} - \Delta p_k;$$

$$\Delta p_{тр} = 8628 - 100 = 8528 \text{ Па.} \approx 8,5 \text{ кПа}.$$

Температура насиченого вологою газу на виході зі скрубера Вентурі визначається за формулою:

$$t_2 = (0,133 - 41 \cdot m) \cdot t_1 + 35; \quad (3.13)$$

$$t_2 = (0,133 - 41 \cdot 0,001) \cdot 200 + 35 = 53,4 \text{ }^\circ\text{C.} \approx 53^\circ\text{C}.$$

Густина газу на виході зі труби Вентурі:

$$\rho_2 = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot [101,3 - (p_r + \Delta p_{тр})]}{(273 + t_2) \cdot 101,3};$$

$$\rho_2 = 1,29 \cdot \frac{273 \cdot [101,3 - (5 + 8,5)]}{(273 + 53) \cdot 101,3} = 0,93 \text{ кг/м}^3.$$

Вибирається труба Вентурі з центральним підведенням зрошувальної рідини в конфузур. При цьому значення коефіцієнта гідравлічного опору  $\xi_1$  сухої труби без зрошення приймається середньою в інтервалі  $0,12 \div 0,15$ , тобто  $\xi_1 = 1,25$ .

Гідравлічний опір зрошуваної труби визначається за формулою (3.10) з урахуванням відповідних значень А і В<sub>2</sub> (див. табл.3.2):

$$\xi_2 = A \cdot \xi_1 \cdot m^{B_2};$$

$$\xi_2 = 0,63 \cdot 0,125 \cdot 0,001^{-0,3} = 0,62.$$

Швидкість газу в горловині труби Вентурі обчислюється за формулою (3.11):

$$u_r = \left( \frac{2 \cdot \Delta p_{\text{тр}}}{(\xi_1 \cdot \rho_2) + (\xi_2 \cdot m \cdot \rho_{\text{ж}})} \right)^{0,5};$$

$$u_r = \left( \frac{2 \cdot 8528}{(0,125 \cdot 0,93) + (0,62 \cdot 0,001 \cdot 1000)} \right)^{0,5} = 152 \text{ м/с.}$$

Об'ємна витрата газу на виході з труби Вентурі складе:

$$V_2 = V_0 \cdot \frac{\rho_0}{\rho_2};$$

$$V_2 = 150000/3600 \cdot \frac{1,29}{0,93} = 57,8 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Діаметр горловини труби Вентурі складе:

$$d_2 = 1,13 \cdot \left( \frac{V_2}{u_r} \right)^{0,5};$$

$$d_2 = 1,13 \cdot \left( \frac{57,8}{152} \right)^{0,5} = 0,69 \text{ м.}$$

Одержане значення діаметра горловини значно перевищує найбільший діаметр горловини типорозмірного ряду високонапірних труб Вентурі: 115, 135, 155, 180, 200, 240, 280, 320, 370, 420.

У зв'язку з цим потрібно встановити кілька паралельно працюючих труб Вентурі. Приймається кількість труб  $n = 4$ . В цьому разі діаметр горловини кожної з чотирьох ідентичних труб складе:

$$d_2 = 1,13 \cdot \left( \frac{V_2}{n \cdot u_r} \right)^{0,5};$$

$$d_2 = 1,13 \cdot \left( \frac{57,8}{4 \cdot 152} \right)^{0,5} = 0,35 \text{ м.}$$

У відповідності з типорозмірним рядом приймається діаметр горловини труби Вентурі 370 мм.

При цьому довжина горловини складе:  $l_2 = 0,15 \cdot d_2 = 0,15 \cdot 0,35 \text{ м.}$

Швидкість газу в горловині труби в цьому разі складе:

$$u_r = \frac{1,13^2 \cdot V_2}{d_2^2 \cdot n};$$

$$u_r = \frac{1,13^2 \cdot 57,8}{0,35^2 \cdot 4} = 150,6 \text{ м/с.}$$

Береться швидкість газу на вході в конфузор і на виході з дифузора труби Вентурі рівною 20 м/с. При цій швидкості діаметр вхідного перерізу конфузора складе:

$$d_1 = 1,13 \cdot \left( \frac{273000}{3600 \cdot 4 \cdot 20} \right)^{0,5} = 1,1 \text{ м,}$$

а діаметр вихідного перерізу дифузора складе:

$$d_3 = 1,13 \cdot \left( \frac{57,8}{4 \cdot 20} \right)^{0,5} = 0,96 \text{ м.}$$

Кут звуження конфузора приймається  $\alpha_1=25^0$ . Довжина конфузора складе:

$$l_1 = [(d_1 - d_2)/2] : \text{tg}(\alpha_1/2);$$

$$l_1 = [(1,1 - 0,35)/2] : \text{tg}(25/2) = 1,7 \text{ м.}$$

Кут розкриття дифузора приймається  $\alpha_2=6^0$ . Довжина дифузора складе:

$$l_3 = [(d_3 - d_2)/2] : \text{tg}(\alpha_2/2);$$

$$l_3 = [(0,96 - 0,35)/2] : \text{tg}(6/2) = 5,8 \text{ м.}$$

Таблиця 3.3 Результати розрахунку скрубера Вентурі

Найменування показників	Позначення	Величина
Розміри скрубера:		
• діаметр вхідного перетину конфузора, м	$d_1$	1,1
• довжина конфузора, м	$l_1$	1,7
• кут звуження конфузора, град.	$\alpha_1$	25
• діаметр горловини, м	$d_2$	0,35
• довжина горловини, м	$l_2$	0,05
• кут розкриття дифузора, град.	$\alpha_2$	6
• довжина дифузора, м	$l_3$	5,8
• діаметр вихідного перерізу дифузора, м	$d_3$	0,96
Ефективність (ступінь) уловлювання пилу	$\eta$	0,98
Гідравлічний опір:		
• труби Вентурі, Па	$\Delta p_{\text{тр}}$	8528
• циклона-краплеуловлювача, Па	$\Delta p_{\text{к}}$	100
• скрубера Вентурі в цілому, Па	$\Delta p_{\text{ан}}$	8628



## ЛІТЕРАТУРА

1. Теверовский Б.З. Очистка промышленных газов в черной металлургии. Справочное пособие. – К.: Техника, 1993. – 151 с.
2. Теверовський Б.З. Розрахунки пристроїв для очищення промислових газів від пилу: Навч. посібник. – К.: НМК ВО, 1991. – 89 с.
3. Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве: Учебник для вузов. 2-е изд.– М.: Металлургия. 1990. – 400 с.
4. Алиев Г.М. – А. Техника пылеулавливания и очистка промышленных газов от пыли: Справ. изд.– М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
5. Очистка технологических и неорганизованных выбросов от пыли в черной металлургии / А.И. Толочко, О.В. Филиппьев, В.И. Славин и др. – М.: Металлургия, 1986. – 208 с.
6. Пылеулавливание в металлургии: Справ. изд. / В.М. Алешина, А.Ю. Вальдберг, Г.М. Гордон и др. – М.: Металлургия, 1984. – 336 с.
7. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др. – М.: Энергоавтомиздат, 1983. – 312 с.

## ДОДАТОК А

### Значення нормальної функції розподілу

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
-2,70	0,0035	-1,06	0,1446	0,00	0,5000	1,08	0,8599
-2,60	0,0047	-1,04	0,1492	0,02	0,5080	1,10	0,8643
-2,50	0,0062	-1,02	0,1539	0,04	0,5160	1,12	0,8686
-2,40	0,0082	-1,00	0,1587	0,06	0,5239	1,14	0,8729
-2,30	0,0107	-0,98	0,1635	0,08	0,5319	1,16	0,8770
-2,20	0,0139	-0,96	0,1685	0,10	0,5398	1,18	0,8810
-2,10	0,0179	-0,94	0,1736	0,12	0,5478	1,20	0,8849
-2,00	0,0228	-0,92	0,1788	0,14	0,5557	1,22	0,8888
-1,98	0,0239	-0,90	0,1841	0,16	0,5636	1,24	0,8925
-1,96	0,0250	-0,88	0,1894	0,18	0,5714	1,26	0,8962
-1,94	0,0262	-0,86	0,1949	0,20	0,5793	1,28	0,8997
-1,92	0,0274	-0,84	0,2005	0,22	0,5871	1,30	0,9032
-1,90	0,0288	-0,82	0,2061	0,24	0,5948	1,32	0,9066
-1,88	0,0301	-0,80	0,2119	0,26	0,6026	1,34	0,9099
-1,86	0,0314	-0,78	0,2177	0,28	0,6103	1,36	0,9131
-1,84	0,0329	-0,76	0,2236	0,30	0,6179	1,38	0,9162
-1,82	0,0344	-0,74	0,2297	0,32	0,6255	1,40	0,9192
-1,80	0,0359	-0,72	0,2358	0,34	0,6331	1,42	0,9222
-1,78	0,0375	-0,70	0,2420	0,36	0,6406	1,44	0,9251
-1,76	0,0392	-0,68	0,2483	0,38	0,6480	1,46	0,9279
-1,74	0,0409	-0,66	0,2546	0,40	0,6554	1,48	0,9306
-1,72	0,0427	-0,64	0,2611	0,42	0,6628	1,50	0,9332
-1,70	0,0446	-0,62	0,2676	0,44	0,6700	1,52	0,9357
-1,68	0,0465	-0,60	0,2743	0,46	0,6772	1,54	0,9382
-1,66	0,0485	-0,58	0,2810	0,48	0,6844	1,56	0,9406
-1,64	0,0505	-0,56	0,2877	0,50	0,6915	1,58	0,9429
-1,62	0,0526	-0,54	0,2946	0,52	0,6985	1,60	0,9452
-1,60	0,0548	-0,52	0,3015	0,54	0,7054	1,62	0,9474
-1,58	0,0571	-0,50	0,3085	0,56	0,7123	1,64	0,9495
-1,56	0,0594	-0,48	0,3156	0,58	0,7190	1,66	0,9515
-1,54	0,0616	-0,46	0,3228	0,60	0,7257	1,68	0,9535
-1,52	0,0643	-0,44	0,3300	0,62	0,7324	1,70	0,9554
-1,50	0,0668	-0,42	0,3372	0,64	0,7389	1,72	0,9573
-1,48	0,0694	-0,40	0,3446	0,66	0,7454	1,74	0,9591
-1,46	0,0721	-0,38	0,3520	0,68	0,7517	1,76	0,9608

Продовження додатка А

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
-1,44	0,0749	-0,36	0,3594	0,70	0,7580	1,78	0,9625
-1,42	0,0778	-0,34	0,3669	0,72	0,7642	1,80	0,9641
-1,40	0,0808	-0,32	0,3745	0,74	0,7703	1,82	0,9656
-1,38	0,0838	-0,30	0,3821	0,76	0,7764	1,84	0,9671
-1,36	0,0869	-0,28	0,3897	0,78	0,7823	1,86	0,9686
-1,34	0,0901	-0,26	0,3974	0,80	0,7881	1,88	0,9699
-1,32	0,0934	-0,24	0,4052	0,82	0,7939	1,90	0,9713
-1,28	0,1003	-0,22	0,4129	0,84	0,7995	1,92	0,9726
-1,26	0,1038	-0,20	0,4207	0,86	0,8051	1,94	0,9738
-1,24	0,1075	-0,18	0,4286	0,88	0,8106	1,96	0,9750
-1,22	0,1112	-0,16	0,4364	0,90	0,8159	1,98	0,9761
-1,20	0,1151	-0,14	0,4443	0,92	0,8212	2,00	0,9772
-1,18	0,1190	-0,12	0,4522	0,94	0,8264	2,10	0,9821
-1,16	0,1230	-0,10	0,4602	0,96	0,8315	2,20	0,9861
-1,14	0,1271	-0,08	0,4681	0,98	0,8365	2,30	0,9893
-1,12	0,1314	-0,06	0,4761	1,00	0,8313	2,40	0,9918
-1,10	0,1357	-0,04	0,4840	1,02	0,8461	2,50	0,9938
-1,08	0,1401	-0,02	0,4920	1,04	0,8508	2,60	0,9953
				1,06	0,8554	2,70	0,9965

Навчальне видання

Гічов Юрій Олександрович

# ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ

## Частина I

Конспект лекцій

Тем. план. , поз.

Підписано до друку . Формат 60×84 1/16. Папір друк. Друк плоский.  
Облік.-вид. арк. . Умов. друк. арк. . Тираж 50 пр. Замовлення. №

Національна металургійна академія України  
49600, м. Дніпропетровськ-5, пр. Гагаріна, 4

---

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ