

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**



**ГІРНИЧИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра екології**

**ОЧИСТКА ГАЗОПИЛОВИХ ВИКИДІВ.  
МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до виконання практичних робіт студентами напряму  
підготовки 6.040106 Екологія, охорона навколишнього  
середовища та збалансоване природокористування

Дніпропетровськ  
НГУ  
2013

Очистка газопилових викидів. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт студентами напряму підготовки 6.040106 Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування / О.С. Ковров, Ю.В. Бучавий. – Д. : Національний гірничий університет, 2013. – 50 с.

Автори:

О.С. Ковров, канд. техн. наук, доц.;

Ю.В. Бучавий, асист.

Затверджено до видання редакційною радою (протокол № 3 від 07.03.2013) за поданням методичної комісії з напряму підготовки 6.040106 Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування (протокол № 1 від 29.01.2013).

У методичних рекомендаціях описано методику виконання практичних робіт із розрахунків газоочисного устаткування при вивченні дисципліни; подано контрольні завдання, питання для самоконтролю, довідковий матеріал у вигляді схем, рисунків, таблиць, список рекомендованої літератури.

Видання має на меті допомогти студентам у засвоєнні теоретичного матеріалу, а також набути практичних навичок розрахунку параметрів основних апаратів для очищення газопилових викидів у різних виробничих галузях, навчитись оцінювати доцільність та ефективність їх застосування як частини комплексних природоохоронних заходів.

Рекомендовано до використання в навчальному процесі підготовки бакалаврів напряму підготовки 6.040106 Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування.

Відповідальна за випуск завідувач кафедри екології д-р біол. наук, проф. А.І. Горова.

## 1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Стрімкий розвиток багатьох галузей промисловості на межі ХХ–ХХІ століть зумовив забруднення навколишнього середовища в глобальному масштабі. Сьогодні однією з найбільш актуальних екологічних проблем вважається насичення повітряного басейну промисловими викидами. Для якісного вирішення цієї проблеми необхідно розглядати весь комплекс питань, які вона породжує, це, зокрема, види забруднень атмосфери і їхні властивості, нормування якості повітря й викидів, принципи утворення забруднювачів, зміна складу викидів в атмосфері, фізичні й хімічні процеси газоочищення, конструкція газоочисного устаткування й розробка технологій газоочищення, утилізація вловлених продуктів тощо. При цьому особлива увага приділяється всебічному аналізу й оптимізації діючих газоочисних пристроїв з урахуванням перспектив упровадження нових технологій.

Майбутні виробничі функції бакалавра вимагають чіткого усвідомлення основ практичного застосування систем газоочищення на гірничих підприємствах. Він повинен розрізняти типи газоочищення, розуміти принципи роботи пристроїв і вміти моделювати комплексні схеми очищення викидів різноманітного походження, а також визначати ефективність цього процесу в забезпеченні необхідної якості атмосферного повітря.

Дані методичні рекомендації до виконання практичних робіт з дисципліни «Очистка газопилових викидів» адресовано студентам напряму підготовки 6.040106 Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування.

**Мета** методичних рекомендацій полягає в закріпленні теоретичних знань, набутих студентами в лекційному курсі, а також у виробленні практичних навичок їх застосування.

Виконання практичних робіт допоможе студентам розраховувати параметри основних апаратів очищення газопилових викидів, що використовуються в різних промислових галузях, оцінювати доцільність та ефективність їх застосування, обґрунтовувати комплексні схеми газоочищення та екологічні заходи з охорони повітряного середовища, на основі чинних інструкцій аналізувати динаміку викидів-забруднювачів, керуючись при цьому вимогами проекту нормативів гранично допустимого викиду (ГДВ) промислового підприємства, а також контролювати процес забруднення атмосферного повітря.

У методичних рекомендаціях описано методику виконання практичних робіт із розрахунку параметрів газоочисного устаткування, подано приклади здійснення розрахунків, контрольні завдання, питання для самоконтролю, довідковий матеріал у вигляді схем, рисунків, таблиць, список рекомендованої літератури, глосарій основних термінів.

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

### РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПИЛООСАДЖУВАЛЬНИХ КАМЕР

**Мета роботи:** ознайомитися з принципом роботи та методикою розрахунку технологічних характеристик пилоосаджувальних камер.

**Методика розрахунку.** Пилові камери діють за принципом осадження частинок при повільному русі газового потоку через робочу камеру, тому основними розмірами камери є її висота й довжина (рис. 1). Геометричні розміри визначають час перебування газового потоку в камері і, відповідно, дозволяють оцінити ефективність очищення.

Пилові камери являють собою громіздкі споруди, що мають низьку ефективність, тому їх застосовують в основному для вловлювання великих частинок сировинних матеріалів, що скупчуються біля оберткових цементних печей, печей для обпалювання магнезиту й доломіту тощо. Для спорудження таких камер зазвичай використовують сталевий профіль, цеглу, збірний залізобетон.

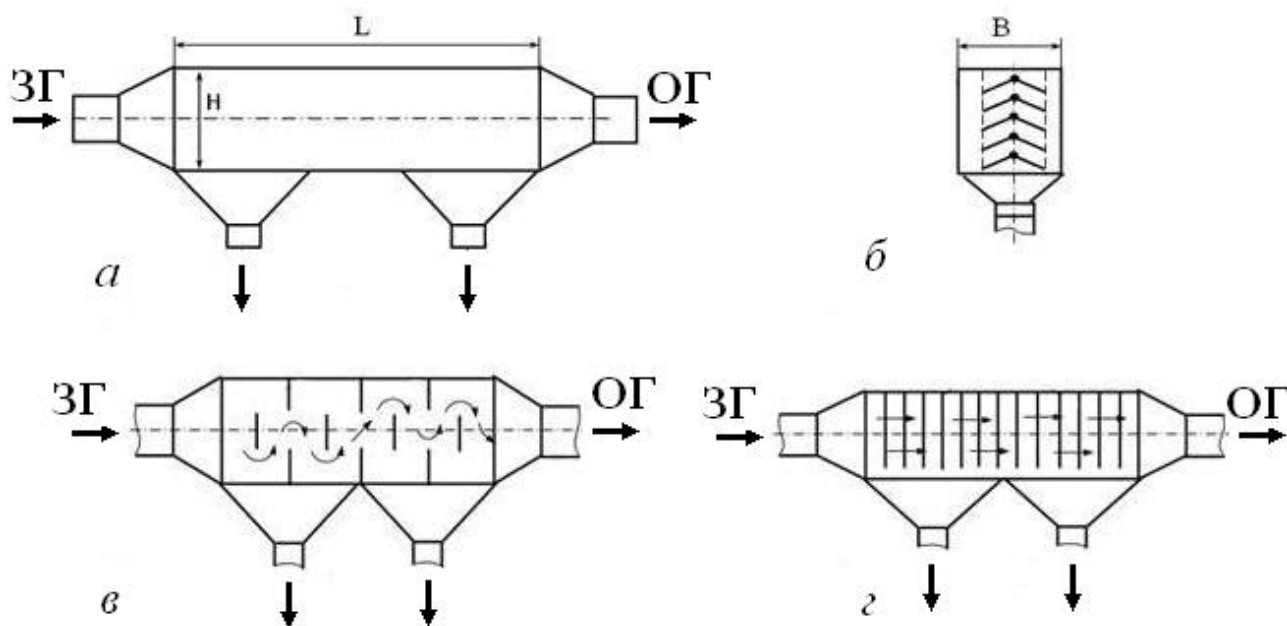


Рис. 1. Схеми пилоосаджувальних камер:

*а* – найпростіша конструкція з розширенням пилопроводу; *б* – багатополічна;  
*в* – з перегородками; *г* – з ланцюговими чи дротяними завісами;  
ЗГ – рух забрудненого газу; ОГ – рух очищеного газу

Габаритні розміри камери, необхідні для осадження твердих частинок з газового потоку, визначають за такою формулою:

$$L = \frac{H \cdot v_r}{w_b}, \quad (1)$$

де  $L$  – довжина камери, м;  $H$  – висота камери, м;  $v_r$  – швидкість руху газів у камері (звичайно 0,2... 1,0 м/с);  $w_b$  – швидкість витання частинок заданого розміру, м/с.

Величину  $v_r$  обчислюємо за такою формулою:

$$v_r = \frac{Q}{H \cdot B}, \quad (2)$$

де  $Q$  – витрата газу, м<sup>3</sup>/с;  $H$  – висота камери, м;  $B$  – ширина каналу пилопроводу, м.

Мінімальний розмір частинок  $d_u$ , м, які будуть повністю осаджені в камері, визначають таким чином:

$$d_u = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu_z \cdot Q}{L \cdot B \cdot g \cdot \rho_u}}, \quad (3)$$

де  $Q$  – витрата газу, м<sup>3</sup>/с;  $L$  – довжина камери, м;  $B$  – ширина камери, м;  $\mu_z$  – динамічна в'язкість газів, Па·с;  $g$  – прискорення вільного падіння частинок, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_u$  – щільність пилових частинок, кг/м<sup>3</sup>.

Швидкість витання (осідання) частинки в пилоосаджувальній камері обчислюється за формулою Стокса, тобто

$$v_u^m = \frac{g \cdot d_u^2 (\rho_u - \rho_z)}{18 \mu_z}. \quad (4)$$

Ступінь очищення газів у пилоосаджувальних камерах звичайно не перевищує 40...50 %. При цьому задовільно осаджуються тільки частинки пилу, розмір яких перевищує 40...50 мкм [1].

### **Приклад розв'язування типової задачі**

*Задача.* Якої висоти має бути шар газу між полицями пилоосаджувальної камери (рис.1, б), щоб осіли частинки пилу, діаметр яких  $d_p = 8$  мкм, а витрата газу  $Q = 1,2$  м<sup>3</sup>/с (за нормальних умов). Довжина камери  $L = 4,5$  м, ширина  $B = 3,0$  м; загальна висота камери  $H = 4,2$  м. Середня температура газу в камері  $t = 450$  °С. В'язкість газу при цій температурі  $\mu = 34 \cdot 10^{-6}$  Па·с, щільність пилу  $\rho_u = 4000$  кг/м<sup>3</sup>, густина газу  $\rho_z = 500$  г/м<sup>3</sup>.

*Розв'язування*

1. Знаходимо витрату газу в заданих умовах таким чином:

$$Q_p = Q \frac{T+t}{T} = 1,2 \frac{(273+450)}{273} = 3,2 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Визначаємо лінійну швидкість газу в камері, тобто

$$v = \frac{Q_p}{B \cdot H} = \frac{3,2}{3 \cdot 4,2} = 0,25 \text{ м/с}.$$

3. Обчислюємо тривалість перебування газу в камері, а саме:

$$t = \frac{L}{v} = \frac{4,5}{0,25} = 18 \text{ с}.$$

4. Теоретичну швидкість осадження кулястих частинок визначаємо за формулою Стокса, тобто

$$v_q^m = \frac{g \cdot d_q^2 (\rho_q - \rho_z)}{18\mu_z} = \frac{9,81 \cdot (8 \cdot 10^{-6})^2 (4000 - 0,5)}{18 \cdot 34 \cdot 10^{-6}} = 0,0041 \text{ м/с.}$$

Приймають що, дійсна швидкість осадження частинок

$$v_q^o = 0,5 \cdot v_q^m = 0,5 \cdot 0,0041 = 0,0021 \text{ м/с.}$$

5. Знаходимо відстань між полицями таким чином:

$$h = v_q^o \cdot t = 0,0021 \cdot 18 = 0,036 \text{ м або } 3,6 \text{ см.}$$

### **Контрольне завдання**

1. Розрахувати параметри роботи пилоосаджувальної камери відповідно до варіанта завдання, наведеного в табл. 1. Решту параметрів для розрахунку взяти з вихідних даних, зазначених у типовій задачі.

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку параметрів пилоосаджувальних камер

№ вар.	Розмір частинок $d_p$ , мкм	Довжина камери $L$ , м	Ширина камери $B$ , м	№ вар.	Розмір частинок $d_p$ , мкм	Довжина камери $L$ , м	Ширина камери $B$ , м
1	8	3,5	2,0	11	6	3,2	2,0
2	10	3,8	2,2	12	12	3,6	2,2
3	15	4,0	2,5	13	45	4,0	2,5
4	18	4,3	3,0	14	40	4,2	3,0
5	20	4,5	3,5	15	30	4,5	3,5
6	25	4,8	3,7	16	35	4,7	3,7
7	30	5,0	3,8	17	15	5,0	3,8
8	35	5,2	4,0	18	20	5,3	4,0
9	40	5,5	4,3	19	10	5,6	4,3
10	45	6,0	4,5	20	25	6,0	4,5

*Примітка.* Номер варіанта кожен студент обирає за своїм порядковим номером у списку академічної групи.

### **Питання для самоконтролю**

1. Які схеми пилоосаджувальних камер використовують для очищення пилових викидів?

2. У чому полягають переваги та недоліки пилоосаджувальних камер різних типів?

3. Яка ефективність очищення пилоосаджувальних камер та від яких факторів вона залежить?

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

### РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ЦИКЛОНА

**Мета роботи:** ознайомитися з принципом роботи та алгоритмом розрахунку фракційної й загальної ефективності відцентрового циклона.

**Методика розрахунку.** Циклони завдяки дешевизні й простоті будови та обслуговування, порівняно невеликому гідравлічному опору й високій продуктивності є найпоширенішими апаратами сухого механічного пиловловлювання.

На рис. 2. подано схему циклона та зображено напрямки потоків повітря в ньому. Як бачимо, запилене повітря з великою швидкістю вводиться тангенціально в апарат. Сформований тут обертовий потік спускається по кільцевому простору (утвореному циліндричною частиною циклона й вихлопною трубою) в його конічну частину, а потім, продовжуючи обертатися, виходить через вихлопну трубу. Частинки, маса яких достатньо велика, відділяються від потоку, досягають стінок циклона і під дією гравітаційних та відцентрових сил опускаються в його бункер. Чим більші частинки, завислі в потоці, і чим інтенсивніший (у відомих межах) обертовий рух, тим ефективніше очищується газ.

Залежно від конструктивного виконання в циклонах може бути по-різному влаштовано підведення запиленого газу (наприклад, тангенціальне, тангенціальне похиле, спіральне, осьове із спрямовувальним апаратом) форма корпусу циклонів теж може бути різною (циліндрична, така, що переходить у конус, з переважно розвинутою конічною частиною, конічна, з розширеною конічною частиною, з подвійною стінкою).

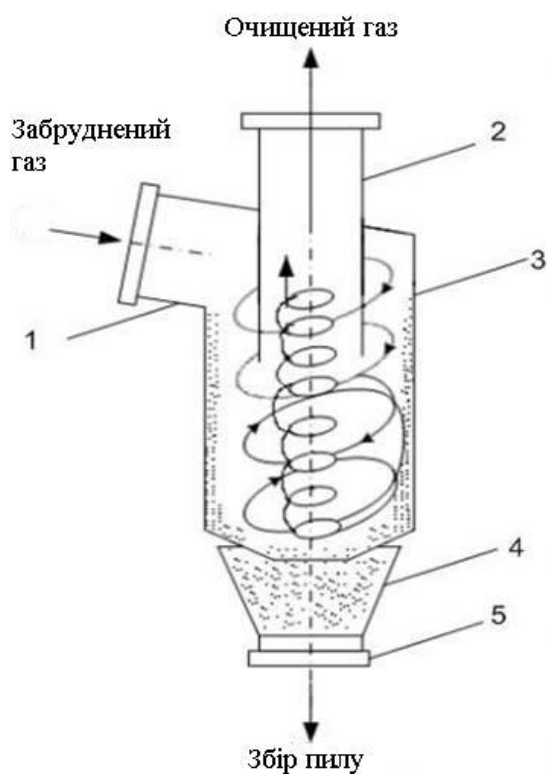


Рис. 2. Принципова схема будови та дії циклона [1]:

1 – вхідний патрубок; 2 – вихлопна труба; 3 – корпус; 4 – пилоосаджувальний бункер; 5 – пиловий затвор

Геометричні розміри циліндричних циклонів конструкції НДЮГАЗ, виражені в частках внутрішнього діаметра корпусу  $D$ , наведено в табл. 2. Для вищенаведених циклонів прийнято такий ряд внутрішнього діаметра  $D$ : 200, 300, 400, 500, 600, 700, 600, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400 і 3000 мм.

Таблиця 2 – Геометричні розміри циліндричних циклонів  
(у частках діаметра корпусу  $D$ )

Розміри	Марка циклона		
	ЦН-15/ЦН-15У	ЦН-24	ЦН-11
Кут нахилу кришки і вхідного патрубку, град	15/15	24	11
Висота вхідного патрубку	0,66/0,66	1,11	0,48
Висота вихлопної труби	1,74/1,5	2,11	1,56
Висота циліндричної частини	2,26/1,51	2,11	2,06
Висота конуса	2,0/1,5	1,75	2,0
Загальна висота	4,56/3,31	4,26	4,38
Ширина вхідного патрубку	0,2	0,2	0,2

Продуктивність циклона залежить від діаметра його корпусу, причому вона підвищується із зростанням останнього. Ефективність пиловловлювання в циклонах серії ЦН зменшується внаслідок збільшення кута нахилу вхідного потоку повітря в циклон. Циліндричні циклони серії ЦН рекомендується використовувати для попереднього очищення газів і встановлювати перед фільтрами чи електрофільтрами.

Щоб розрахувати параметри циклонів, необхідні такі вихідні дані:

- кількість газу  $Q_p$ , що очищується в робочих умовах,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;
- густина газу  $\rho_g$  в робочих умовах,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;
- динамічна в'язкість газу  $\mu$  при робочій температурі,  $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ ;
- дисперсний склад пилу, який задається параметрами  $d_{50}$ , мкм, і  $\lg\sigma_g$ ;
- запиленість газу,  $C$ ,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;
- щільність частинок пилу  $\rho_n$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;
- необхідна ефективність очищення газу  $\eta$ , %.

Розрахунок виконується методом послідовних наближень у такій послідовності:

1. Задаємо тип циклона і визначаємо оптимальну швидкість газу в апараті  $W_{opt}$ ,  $\text{м}/\text{с}$ , за показниками табл. 3.

2. Визначаємо необхідну площу перерізу циклона,  $\text{м}^2$ , за такою формулою:

$$S = \frac{Q_p}{W_{opt}} \quad (5)$$

3. Визначаємо діаметр корпусу циклона,  $\text{м}$ , таким чином:

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (6)$$



Таблиця 3 – Параметри, які визначають ефективність роботи циклонів

Параметри	Одиниця виміру	Циклони конструкції НДЮГАЗ				Циклони конструкції ВЦНДІОП і Діпродеревопрому		
		ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СЮП	ВЦНДІ ОП	Діпродеревпром (тип Ц)
$d_{50}^T$	мкм	8,50	6,00	4,50	3,65	2,6	8,6	4,12
$\lg \sigma_{\eta}^T$	без-розм.	0,308	0,283	0,352	0,352	0,28	0,32	0,34
$W_{onm}$	м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	1,00	4,00	3,3
$\xi$	Н·с/м <sup>2</sup>	75	165	155	245	1400	75	210

Таблиця 4 – Значення коефіцієнтів опору циклонів типу НДЮГАЗ, Н·с/м<sup>2</sup> ( $D = 500$  мм,  $W = 3$  м/с)

Тип циклона	$d/D$	Без додаткових пристроїв		З кільцевим дифуззором		З вихідним завитком
		$\xi_{\eta}^c$	$\xi_{\eta}^n$	$\xi_{\eta}^c$	$\xi_{\eta}^n$	
ЦН-11	0,59	245	250	207	215	235
ЦН-15	0,59	155	163	132	140	150
ЦН-15У	0,59	165	170	140	148	158
ЦН-24	0,59	75	80	64	70	73

Отримана за формулою (6) величина  $D$  округлюється до таких значень: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400, 3000 мм. Якщо розрахунковий діаметр перевищує його максимально допустиме значення, то необхідно застосувати паралельно встановлені циклони.

4. За вибраним діаметром циклона знаходимо швидкість руху повітряної маси, м/с в ньому, а саме:

$$W_{\partial} = \frac{4Q}{\pi ND^2}. \quad (7)$$

Отримане за формулою (7) значення дійсної швидкості газу в циклоні не повинно відхилитися від оптимальної швидкості більше ніж на 15 %.

5. З табл. 3 або 4 обирають значення коефіцієнта гідравлічного опору  $\xi$ , відповідне заданому типу циклона. При розрахунку циклонів типу НДЮГАЗ (одиначних чи груп) вводяться уточнювальні поправки за такою формулою:

$$\xi = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{500}^{c(n)} + K_3, \quad (8)$$

де  $\xi_{500}^{c(n)}$  – коефіцієнт гідравлічного опору в одиночному циклоні діаметром 500 мм (табл. 3). У формулі (8) індекс  $c$  означає, що циклон працює в гідравлічній мережі, а  $n$  – без мережі, тобто відбувається безпосередній викид повітря в

атмосферу;  $K_1$  – поправковий коефіцієнт на визначення діаметра циклона, зокрема в розрахунках установок типу НДІОГАЗ ( $D = 150, 200, 300, 450, 500$  мм), його величина становить 0,85, 0,9, 0,93, 1,0, 1,0 відповідно;  $K_2$  – поправковий коефіцієнт на ступінь запиленості газу (табл. 5);  $K_3$  – коефіцієнт, який враховує додаткові втрати тиску при роботі групи циклонів (табл. 6), а коли циклон один, то  $K_3 = 0$ .

Таблиця 5 – Значення поправкових коефіцієнтів  $K_2$  на ступінь запиленості газів, що надходять у циклон ( $D = 500$  мм)

Марка циклона	Запиленість газів, $C_{вх}$ , г/м <sup>3</sup>						
	1	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15У	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86

Таблиця 6 – Значення поправкових коефіцієнтів  $K_3$  для розрахунку параметрів групи циклонів марки ЦН

Характеристика групи циклонів	Значення коефіцієнта $K_3$
Кругове компонування, нижнє підведення газу	60
Прямокутне компонування, циклонні елементи розташовані в одній площині. Відведення чистого газу із загальної камери	35
Прямокутне компонування, завиткове відведення газу із циклонних елементів	28
Прямокутне компонування. Вільне підведення газового потоку в загальну камеру	60

6. Втрати тиску в циклоні на вході та виході обчислюються за такою формулою:

$$\Delta P = P_{вх} - P_{вих} = \frac{\xi \cdot \rho_g \cdot W^2}{2}, \quad (9)$$

де  $P_{вх}$  та  $P_{вих}$  – значення тиску на вході в циклон та на виході з нього відповідно;  $\xi$  – коефіцієнт гідравлічного опору циклона;  $\rho_g$  – густина газу в робочих умовах.

Якщо величина  $\Delta P$  виявилась допустимою ( $\Delta P_{дон} \leq 2500$  Па), далі виконується розрахунок повного опору очищення газу в циклоні. При цьому приймається, що коефіцієнт очищення газів в одиночному циклоні та в групі циклонів однаковий. У дійсності ця величина в групі циклонів може виявитися нижчою, ніж в одиночному циклоні, за рахунок руху газу через загальний бункер.

7. Із табл. 3 обирають значення параметрів  $d_{50}^T$  та  $\lg \sigma_\eta^T$  й обчислюють середній розмір частинок пилу (медіанну тонкість очищення)  $d_{50}$  в робочих умо-

вах (діаметр циклона  $D$ , швидкість потоку  $W$ , щільність пилу  $\rho_n$ , динамічна в'язкість газу  $\mu$ ) за такою формулою:

$$d_{50} = d_{50}^T \cdot \sqrt{\frac{D}{D_T} \cdot \frac{\rho_{II}^T}{\rho_{II}} \cdot \frac{\mu}{\mu_T} \cdot \frac{W_T}{W}}, \quad (10)$$

де  $d_{50}^T$  – розмір частинок, які вловлюються умовним (типовим) циклоном на 50 %, (встановлено, що в ньому  $D_T = 0,6$  м, швидкість газу  $W_T = 3,5$  м/с, щільність пилу  $\rho_{II}^T = 1930$  кг/м<sup>3</sup>, динамічна в'язкість газу  $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$  Н·с/м<sup>2</sup>).

8. Ефективність пиловловлювання (очищення) в циклоні знаходимо за такою формулою:

$$\eta = 50[1 + \Phi(X)], \quad (11)$$

де  $\Phi(X)$  – таблична функція залежності ефективності очистки  $\eta$  від параметра  $X$ , який має таке значення:

$$X = \frac{\lg\left(\frac{d_{pj}}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta}^T + \lg^2 \sigma_{\eta}}}, \quad (12)$$

тут  $d_{pj}$  – розмір частинок пилу  $j$ -ї фракції в газопиловій суміші, мкм;  $\lg \sigma_{\eta}$  – ступінь полідисперсності пилу. Значення параметрів  $d_{50}$  і  $\lg \sigma_{\eta}$  для деяких видів пилу наведені в табл. 7.

Таблиця 7 – Середні розміри частинок ( $d_{50}$ ) й полідисперсність ( $\lg \sigma_{\eta}$ ) деяких видів пилу

Технологічний процес	Вид пилу	$d_{50}$ , мкм	$\lg \sigma_{\eta}$
Заточування інструменту	Метал, абразив	38	0,214
Розмелювання в кульовому млині	Цемент	20	0,468
Сушіння вугілля в барабані	Кам'яне вугілля	15	0,334
Експериментальні дослідження	Кварцовий пил	3,7	0,405

9. У додатку А знаходимо величину нормальної функції розподілу  $\Phi(X)$  ефективності очищення газу відповідно до обчисленого за формулою (12) значення  $X$ . Якщо результат розрахунку параметра  $\eta$  виявиться меншим від необхідного за умовами допустимого викиду пилу в атмосферу, то потрібно вибрати інший тип циклона з більшим значенням коефіцієнта гідравлічного опору [2].

Розраховане значення ефективності  $\eta$  пиловловлювання в циклоні порівнюють із необхідним (проектним) показником ефективності  $\eta_{np}$ , беручи до уваги концентрацію пилу в газовій суміші до її надходження в циклон та на виході з нього. Цей параметр обчислюють таким чином:

$$\eta_{np} = \frac{C_{ex} - C_{вих}}{C_{ex}} \cdot 100 \%, \quad (13)$$

де  $C_{ex}$ ,  $C_{вих}$  – концентрація пилу в газопиловій суміші на вході в циклон та на виході з нього,  $г/м^3$  [3].

Загальна ефективність циклона  $\eta_{заг}$ , є сумою значень ефективності вловлювання частинок різних фракцій, її обчислюють за такою формулою:

$$\eta_{заг} = \sum_{j=1}^n \eta_j \cdot m_j, \%, \quad (14)$$

де  $\eta_j$  – ефективність уловлювання частинок  $j$ -ї фракції,  $m_j$  – масовий вміст частинок  $j$ -ї фракції, %.

Відповідно, викид в атмосферу часток пилу  $P$  розраховується таким чином:

$$P = 100 - \eta_{заг}, \%. \quad (15)$$

### Приклад розв'язування типової задачі

*Задача.* Для очищення вентиляційного викиду внаслідок пересипання вугілля на технологічному комплексі вугільної шахти необхідно встановити звичайний циклонний пиловловлювач, його проектна ефективність має бути не меншою такої величини:  $\eta_{np} = 87 \%$ . Потрібно обчислити фракційну та загальну ефективність пиловловлювання з урахуванням таких вхідних даних:

- витрата газу  $Q_p = 6500 \text{ м}^3/\text{год}$  ( $1,806 \text{ м}^3/\text{с}$ );
- динамічна в'язкість газу  $\mu = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2 = 0,08 \text{ кг}/\text{м} \cdot \text{год}$ ;
- щільність частинок пилу  $\rho_{II} = 1750 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;
- густина газу в робочих умовах  $\rho_g = 0,89 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;
- дисперсний склад пилу  $lg\sigma_c = 0,6$ ;
- запиленість газу  $C_{ex} = 30 \text{ г}/\text{м}^3$ .

Процентний вміст частинок пилу певної фракції у вентиляційному викиді за даними інвентаризації джерел викидів наведено в табл. 8.

Таблиця 8 – Фракційний розподіл частинок пилу

Розмір частинок пилу $d_{p2}$ , мкм	Середній розмір частинок пилу $d_{pi2}$ , мкм	Вміст частинок пилу у викидах $m_i$ , % від маси
0...2	1	1,0
2...4	3	9,0
4...6	5	10,0
6...10	8	30,0
10...18	14	30,0
18...30	24	14,0
30...50	40	5,0
50...100	75	1,0

### Розв'язування

1. Для розрахунку параметрів циклона за вищенаведеною методикою [1] обрано апарат ЦН-11, діаметр циліндричної частини якого  $D = 0,5$  м, а також використано величини з табл. 3, 4, 5, 7; прийнято також, що  $W_{onm} = 3,5$  м/с.

2. Розраховують необхідну площу перерізу циклонів таким чином:

$$F = \frac{Q_p}{W_{onm}} = \frac{1,806}{3,5} = 0,507 \text{ м}^2 \quad \text{за умови, що } Q_p = 6500 \text{ м}^3/\text{ч} (1,806 \text{ м}^3/\text{с}).$$

Визначають діаметр корпусу циклона з урахуванням кількості установок у групі, а саме  $N$ :

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785 \cdot N}} = \sqrt{\frac{0,507}{0,785 \cdot 1}} = \sqrt{0,648} = 0,805 \text{ м.}$$

Найближче стандартне значення цієї величини  $D = 800$  мм.

3. Дійсна швидкість газу в циклоні

$$W = \frac{Q}{0,785 \cdot N \cdot D^2} = \frac{1,806}{0,785 \cdot 1 \cdot 0,805^2} = \frac{1,806}{0,5024} = 3,595 \text{ м/с.}$$

Швидкість переміщення газу не повинна відхилитися більш ніж на 15 % від оптимальної.

4. Обчислюють коефіцієнт гідравлічного опору в одиночному циклоні або в групі циклонів таким чином:

$$\xi = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{500}^{c(n)} + K_3 = 1 \cdot 0,94 \cdot 245 + 60 = 276,5.$$

5. Визначають гідравлічний опір у циклоні, а саме:

$$\Delta\rho = \frac{\xi \cdot \rho \cdot W^2}{2} = \frac{276,5 \cdot 0,89 \cdot (3,595)^2}{2} = \frac{3180,4}{2} = 1590,2 \text{ Па.}$$

6. Із табл. 3 беремо такі значення величин (відповідних установці марки ЦН-11):  $d_{50}^m = 3,65$  мкм та  $\lg \sigma_\eta^T = 0,352$ .

Обчислюємо значення величини  $d_{50}$ , беручи до уваги параметри роботи типового циклона ( $D_T = 0,6$  м;  $\rho_{nm} = 1930$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$  Н·с/м<sup>2</sup>;  $W_T = 3,5$  м/с) за такою формулою:

$$d_{50} = d_{50}^T \cdot \sqrt{\frac{D}{D_T} \cdot \frac{\rho_{II}^T}{\rho_{II}} \cdot \frac{\mu}{\mu_T} \cdot \frac{W_T}{W}} = 3,65 \cdot \sqrt{\frac{0,805}{0,6} \cdot \frac{1930}{1750} \cdot 1 \cdot \frac{3,5}{3,595}} = 3,65 \cdot \sqrt{1,342 \cdot 1,103 \cdot 1 \cdot 0,974} = 4,38 \text{ мкм.}$$

Розраховують параметр  $X$  для частинок розміром 25 мкм, тобто

$$X = \frac{\lg \frac{d_n}{d_{50}}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_n}} = \frac{\lg \frac{25}{4,383}}{\sqrt{0,352^2 + 0,6^2}} = \frac{\lg 5,704}{\sqrt{0,124 + 0,36}} = \frac{0,756}{\sqrt{0,483}} = \frac{0,756}{0,695} = 1,088.$$

У додатку А знаходять, що  $\Phi(X) = 0,8643$ .

Визначають ефективність пиловловлювання в циклоні частинок розміром 25 мкм таким чином:

$$\eta = 50[1 + \Phi(x)] = 50[1 + 0,8643] = 93,22 \%$$

Концентрація пилу на виході з циклона

$$C_{вих} = C_{вх} - \frac{C_{вх} \cdot \eta_{пр}}{100} = 30 - \frac{30 \cdot 93,22}{100} = 30 - 27,97 = 2,03 \text{ г/м}^3$$

### **Контрольне завдання**

1. Розрахувати фракційну й загальну ефективність циклона відповідно до варіанта завдання, наведеного в табл. 9, та з огляду на фракційний розподіл частинок (див. табл. 8). Решту параметрів для розрахунку (динамічна в'язкість газу, густина газу, дисперсний склад пилу  $lg\sigma_c$  тощо) взяти у вихідних даних до розв'язування типової задачі.

Таблиця 9 – Вихідні дані для розрахунку технологічних параметрів циклона

№ вар.	Витрата газу $Q_p$ , тис. м <sup>3</sup> /год	Щільність пилу $\rho_{п}$ , кг/м <sup>3</sup>	Запиле-ність газу $C_{вх}$ , г/м <sup>3</sup>	№ вар.	Витрата газу $Q_p$ , тис. м <sup>3</sup> /год	Щільність пилу $\rho_{п}$ , кг/м <sup>3</sup>	Запиле-ність газу $C_{вх}$ , г/м <sup>3</sup>
1	6	1450	5,0	11	11	1450	12,0
2	6,5	1500	5,2	12	11,5	1500	13,2
3	7	1550	6,3	13	12	1550	14,5
4	7,5	1650	6,7	14	12,5	1650	15,0
5	8	1700	7,0	15	13	1700	16,5
6	8,5	1750	7,5	16	13,5	1750	17,7
7	9	1800	8,8	17	14	1800	18,8
8	9,5	1850	9,0	18	14,5	1850	19,0
9	10	1900	10,3	19	15	1900	20,0
10	10,5	1950	11,5	20	15,5	1950	21,5

*Примітка.* Номер варіанта кожен студент обирає за своїм порядковим номером у списку академічної групи.

2. Користуючись отриманими результатами розрахунку, побудувати діаграму фракційної ефективності циклона.

3. Визначити, який вміст частинок пилу у викидах, що надходять в атмосферу.

### Питання для самоконтролю

1. Опишіть будову відцентрового циклона та принцип його роботи.
2. Поясніть значення фракційного розподілу пилу в практиці очищення газопилових викидів.
3. Назвіть основні галузі й напрями використання апаратів сухого очищення газів від механічних частинок пилу.
4. Охарактеризуйте пил за фізико-механічними властивостями.
5. Чому недоцільно використовувати циклони для вловлювання дрібнодисперсних частинок пилу розміром менше 10 мкм?

### ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3

#### РОЗРАХУНОК ФРАКЦІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДЦЕНТРОВОГО ЦИКЛОНА ЗА МЕТОДИКОЮ ЛАПЛЕ

**Мета роботи:** ознайомитися з принципом роботи та алгоритмом розрахунку фракційної й загальної ефективності пиловловлювання у відцентровому циклоні.

**Методика розрахунку** Лапле дозволяє обчислити фракційну та загальну ефективність пиловловлювання. Вона адаптована для оцінювання роботи високоефективних, звичайних та високопродуктивних циклонів (рис. 3).

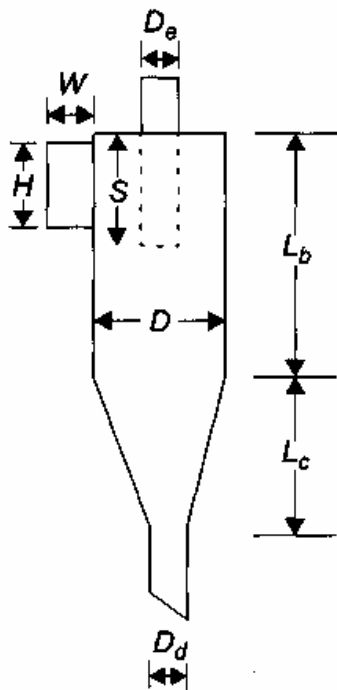


Рис. 3. Принципова схема будови циліндричного циклона:

$D$  – діаметр циліндричної частини;  
 $D_e$  – діаметр газовипускного патрубку;  
 $D_d$  – діаметр бункерної частини;  
 $H$  – висота впускної труби;  $L_b$  – довжина циліндричної частини;  $L_c$  – довжина конічної частини;  $S$  – довжина випускного газоходу всередині циклона;  $W$  – ширина вхідного газоходу

Умовні розміри циклонів, визначені за методикою Лапле, наведено в табл. 10. Вибір розміру й типу циклона залежить від параметрів витрати газової

суміші, проектної ефективності газоочищення, фракційного розподілу частинок та інших величин.

Таблиця 10 – Фізичні розміри відцентрованих циклонів

Показник	Тип циклона		
	Високоєфективний	Звичайний	Високопродуктивний
Діаметр циліндричної частини $D$ , м	1,0	1,0	1,0
Висота впускної труби $H$ , м	0,44 $D$	0,5 $D$	0,75 $D$
Ширина впускної труби $W$ , м	0,2 $D$	0,25 $D$	0,35 $D$
Діаметр газовипускного патрубку $D_e$ , м	0,4 $D$	0,5 $D$	0,75 $D$
Довжина випускного газоходу в циклоні $S$ , м	0,5 $D$	0,6 $D$	0,85 $D$
Довжина циліндричної частини $L_b$ , м	1,5 $D$	2,0 $D$	1,7 $D$
Довжина конічної частини $L_c$ , м	2,5 $D$	2,0 $D$	2,0 $D$
Діаметр бункерної частини $D_d$ , м	0,4 $D$	0,25 $D$	0,375 $D$

Газовий потік надходить у циклон тангенціально, унаслідок чого виникає ефект вихору. Скільки обертів робить при цьому частинка пилу, можна визначити за такою формулою:

$$N_e = \frac{1}{H} \left[ L_b + \frac{L_c}{2} \right], \quad (16)$$

де  $H$  – висота впускної труби, м;  $L_b$  – довжина циліндричної частини циклона, м;  $L_c$  – довжина конічної частини циклона, м.

Час, протягом якого газ перебуває у вихровому потоці,

$$\Delta t = \frac{2\pi R N_e}{V_i}, \quad (17)$$

де  $R$  – радіус циліндричної частини циклона, м;  $V_i$  – початкова швидкість газового потоку, м/с, що розраховується таким чином:

$$V_i = \frac{M}{W \cdot H}, \quad (18)$$

де  $M$  – витрата суміші, м<sup>3</sup>/с;  $W$  та  $H$  – ширина й висота впускної труби відповідно, м<sup>2</sup>.

Унаслідок дії відцентрової сили розвивається максимальна швидкість частинки в газовому потоці, коли відцентрова сила дорівнює силі тертя.



Найбільша відстань, яку частинка проходить у циклоні з максимальною швидкістю, дорівнює ширині вхідного газоходу  $W$ . Таким чином, максимальна швидкість переміщення частинки в радіальному напрямку

$$V_t = \frac{W}{\Delta t}, \text{ м/с.} \quad (19)$$

Швидкість будь-якої частинки газового потоку може бути подана таким виразом:

$$V_t = \frac{d_p^2 (\rho_n - \rho_g) V_i^2}{18 \mu R}, \text{ м/с} \quad (20)$$

де  $d_p$  – діаметр частинок, м;  $\rho_n$  – щільність частинок пилу, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_g$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – коефіцієнт опору середовища, кг/(м·с). Підставивши рівняння (17) у вираз (19) та зрівнюючи між собою вирази (19) й (20), отримуємо формулу (21) для визначення діаметра частинок пилу, що вловлюються циклоном, тобто

$$d_p = \sqrt{\frac{9 \mu W_t}{\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)}}. \quad (21)$$

Теоретично величина  $d_p$  являє собою діаметр найменшої частинки, що вловлюється в циклоні, а значить будь-які частинки більшого розміру начебто повинні вловлюватися на 100 %. Однак на практиці досягти цього не можливо.

З метою отримання більш точного результату використовують напівемпіричну формулу Лапле для розрахунку діаметра частинок пилу, які вловлюються на 50 %, а саме:

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9 \mu W}{2 \pi N_e V_i (\rho_n - \rho_g)}}. \quad (22)$$

Ефективність уловлювання частинок будь-якого розміру обчислюють за формулою:

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{pc}}{d_{pj}}\right)^2}, \quad (23)$$

де  $\eta_j$  – ефективність уловлювання частинок  $j$ -го розміру, %,  $d_{pj}$  – діаметр частинок, м.

Загальна ефективність пиловловлювання в циклоні  $\eta_{заг}$ , %, являє собою суму значень ефективності вловлювання частинок різних фракцій, а саме:

$$\eta_{заг} = \sum_{j=1}^n \eta_j \cdot m_j, \quad (24)$$

де  $m_j$  – масовий вміст частинок пилу  $j$ -го розміру, % [4].

Отже, викид в атмосферу частинок пилу після проходження пилогазової суміші через циклон розраховують таким чином:

$$P = 100 - \eta_o, \%. \quad (25)$$

### Приклад розв'язування типової задачі

Визначити загальну ефективність вискоефективного циклона, діаметр циліндричної частини якого  $D = 0,2$  м, беручи до уваги такі параметри: витрата газової суміші  $M = 250$  м<sup>3</sup>/год; орієнтовна швидкість руху газового потоку  $V_i = 1200$  м/хв; коефіцієнт опору середовища  $\mu = 0,075$  кг/(м·год); густина газу  $\rho_g = 1,01$  кг/м<sup>3</sup>; щільність частинок пилу  $\rho_p = 1600$  кг/м<sup>3</sup> (їх фракційний розподіл відображено в табл. 11).

Таблиця 11 – Фракційний розподіл частинок пилу у викидах

Розмір частинок пилу, мкм	Середнє значення розміру частинок пилу $d_{pi}$ , мкм	Вміст частинок пилу у викидах $m_j$ , % від маси
0 ... 5	2,5	12
5 ... 10	7,5	15
10 ... 20	15,0	22
20 ... 30	25,0	15
30 ... 40	35,0	11
40 ... 50	45,0	9
50 ... 60	55,0	7
60 ... 70	65,0	5
70 ... 80	75,0	3
75 ... 100	87,5	1

#### Розв'язування

1. Фізичні розміри складових частин вискоефективного циклона визначають залежно від величини діаметра його циліндричної частини  $D$  (табл. 12).

Таблиця 12 – Фізичні розміри складових частин циклона

Показники	Відносні значення	Абсолютні значення, м
Діаметр в циліндричній частині, $D$	1	0,2
Висота впускної труби, $H$	$0,44D$	0,088
Ширина впускної труби, $W$	$0,2D$	0,04
Діаметр газовипускного патрубку, $D_e$	$0,4D$	0,08
Довжина випускного газоходу всередині циклона, $S$	$0,5D$	0,1
Довжина циліндричної частини, $L_b$	$1,5D$	0,3
Довжина конічної частини, $L_c$	$2,5D$	0,5
Діаметр бункерної частини, $D_d$	$0,4D$	0,08

2. Визначимо кількість ефективних обертів, які робить частинка,

$$N_e = \frac{1}{H} \left[ L_b + \frac{L_c}{2} \right] = \frac{1}{0,088} \left[ 0,3 + \frac{0,5}{2} \right] = 6,25.$$

3. Початкова швидкість газового потоку на вході в циклон

$$V_i = \frac{M}{W \cdot H} = \frac{250 \text{ м}^3 / \text{ч}}{0,04 \text{ м} \cdot 0,088 \text{ м}} = \frac{250 \text{ м}^3 / \text{ч}}{0,00352 \text{ м}^2} = 1200 \text{ м/хв.}$$

4. Обчислюємо діаметр частинок, які вловлюються циклоном, таким чином:

$$d_p = \sqrt{\frac{9\mu W}{\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 0,075 \cdot 0,04}{3,14 \cdot 6,25 \cdot 72000 \cdot (1600 - 1)}} = 3,46 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 3,46 \text{ мкм.}$$

5. Розраховуємо розмір частинок, які вловлюються даним циклоном на 50 %, а саме:

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu W}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 0,075 \cdot 0,04}{2 \cdot 3,14 \cdot 6,25 \cdot 72000 \cdot (1600 - 1)}} = 2,44 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 2,44 \text{ мкм.}$$

5. Визначаємо ефективність уловлювання частинок усіх розмірів, виконавши такі обчислення:

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{pc}}{d_{pj}} \right)^2} = \frac{1}{1 + \left( \frac{2,44}{2,5} \right)^2} = 0,5112 \quad (\text{для частинок діаметром } 2,5 \text{ мкм});$$

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{pc}}{d_{pj}} \right)^2} = \frac{1}{1 + \left( \frac{2,44}{7,5} \right)^2} = 0,9040 \quad (\text{для частинок діаметром } 7,5 \text{ мкм});$$

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{pc}}{d_{pj}} \right)^2} = \frac{1}{1 + \left( \frac{2,44}{15} \right)^2} = 0,9741 \quad (\text{для частинок діаметром } 15 \text{ мкм});$$

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{pc}}{d_{pj}} \right)^2} = \frac{1}{1 + \left( \frac{2,44}{25} \right)^2} = 0,9905 \quad (\text{для частинок діаметром } 25 \text{ мкм});$$

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{pc}}{d_{pj}} \right)^2} = \frac{1}{1 + \left( \frac{2,44}{35} \right)^2} = 0,9951 \quad (\text{для частинок діаметром } 35 \text{ мкм});$$

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{pc}}{d_{pj}} \right)^2} = \frac{1}{1 + \left( \frac{2,44}{45} \right)^2} = 0,9971 \quad (\text{для частинок діаметром } 45 \text{ мкм});$$

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{pc}}{d_{pj}}\right)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2,44}{55}\right)^2} = 0,9980 \quad (\text{для частинок діаметром } 55 \text{ мкм});$$

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{pc}}{d_{pj}}\right)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2,44}{65}\right)^2} = 0,9986 \quad (\text{для частинок діаметром } 65 \text{ мкм});$$

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{pc}}{d_{pj}}\right)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2,44}{75}\right)^2} = 0,9989 \quad (\text{для частинок діаметром } 75 \text{ мкм});$$

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{pc}}{d_{pj}}\right)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2,44}{87,5}\right)^2} = 0,9992 \quad (\text{для частинок діаметром } 87,5 \text{ мкм}).$$

6. Визначаємо загальну ефективність циклона таким чином:

$$\begin{aligned} \eta_o &= \sum_{j=1}^n \eta_j \cdot m_j = \sum_{j=1}^n 0,5112 \cdot 12 + 0,9040 \cdot 15 + 0,9741 \cdot 22 + 0,9905 \cdot 15 + \\ &+ 0,9951 \cdot 11 + 0,9971 \cdot 9 + 0,9980 \cdot 7 + 0,9986 \cdot 5 + 0,9989 \cdot 3 + 0,9992 \cdot 1 = \\ &= 6,13 + 13,56 + 21,43 + 14,86 + 10,95 + 8,97 + 6,99 + 4,99 + 3,00 + 1,00 = 91,88 \%. \end{aligned}$$

Отже, в атмосферу надходить така частка пилу:

$$P = 100 - 91,88 = 8,12 \%$$

Результати обчислень зводимо в табл. 13.

Таблиця 13 – Результати розрахунків ефективності циклона

$j$	$d_{pj}$	$m_j$	$d_{pc}$	$d_{pc}/d_{pj}$	$n_j$	$n_j \cdot m_j$
1	2,5	12	2,44	0,978	0,5112	6,13
2	7,5	15	2,44	0,326	0,9040	13,56
3	15	22	2,44	0,163	0,9741	21,43
4	25	15	2,44	0,098	0,9905	14,86
5	35	11	2,44	0,070	0,9951	10,95
6	45	9	2,44	0,054	0,9971	8,97
7	55	7	2,44	0,044	0,9980	6,99
8	65	5	2,44	0,038	0,9986	4,99
9	75	3	2,44	0,033	0,9989	3,00
10	87,5	1	2,44	0,028	0,9992	1,00
					$\Sigma$	<b>91,88</b>

Таким чином, розрахункова ефективність пиловловлювання циклона та вміст пилу у викиді становлять 91,88 % і 8,12 % відповідно. Графік ефективності вловлювання циклоном частинок пилу різних фракцій зображено на рис. 4.

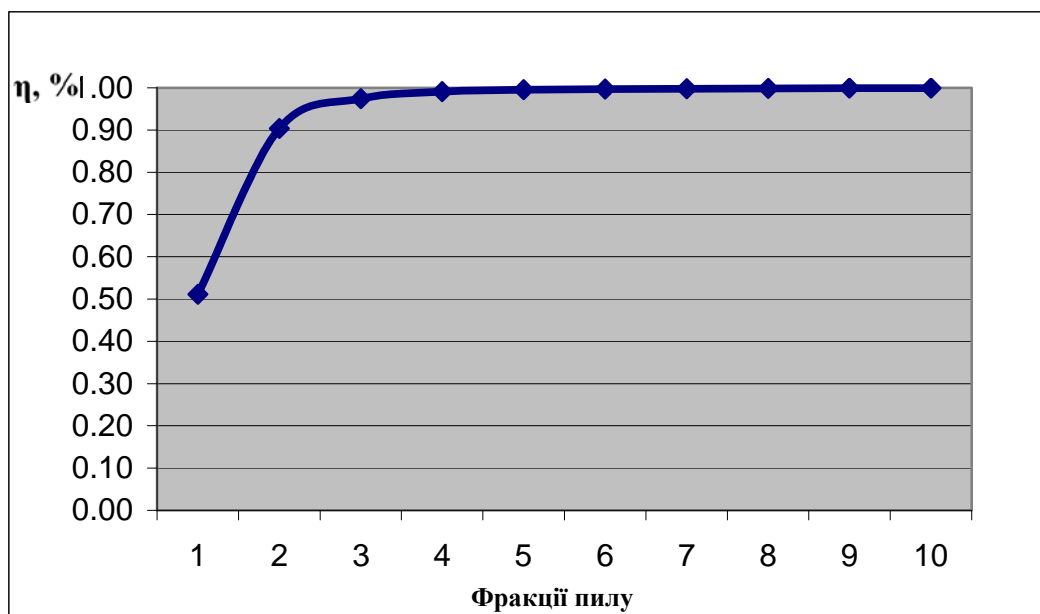


Рис. 4. Залежність ефективності циклона від фракційного складу пилу

### Контрольне завдання

1. Розрахувати фракційну й загальну ефективність циклона відповідно до варіанта завдання, наведеного в табл. 14, та користуючись даними про їх фракційний розподіл з додатка А. Решту параметрів для розрахунку взяти з вихідних даних до розв'язування типової задачі.

Таблиця 14 – Вихідні дані для розрахунку параметрів циклона

№ вар.	Діаметр циліндричної частини $D$ , м	Витрати газоповітряної суміші $M$ , м <sup>3</sup> /год	Щільність частинок пилу $\rho_p$ , кг/м <sup>3</sup>	№ вар.	Діаметр циліндричної частини $D$ , м	Витрати газоповітряної суміші $M$ , м <sup>3</sup> /год	Щільність частинок пилу $\rho_p$ , кг/м <sup>3</sup>
1	0,6	21000	1550	11	0,9	50000	1600
2	0,7	29000	1600	12	1,0	60000	1650
3	0,8	43000	1650	13	1,1	70000	1680
4	0,9	48000	1680	14	1,2	80000	1700
5	1,0	58000	1700	15	0,6	20000	1600
6	1,1	69000	1600	16	0,7	30000	1680
7	1,2	80000	1680	17	0,8	40000	1800
8	0,6	20000	1800	18	0,9	50000	1700
9	0,7	30000	1700	19	1,0	60000	1550
10	0,8	40000	1550	20	1,1	70000	1600

*Примітка.* Номер варіанта кожен студент обирає за своїм порядковим номером у списку академічної групи.

2. Згідно з отриманими результатами розрахунку побудувати діаграму залежності ефективності циклона від фракційного складу пилу.
3. Визначити частку викидів пилу в атмосферу.

### *Питання для самоконтролю*

1. Опишіть схему будови відцентрового циклона та принцип його роботи.
2. Поясніть необхідність врахування фракційного розподілу пилу в практиці очищення газопилових викидів.
3. Назвіть основні галузі й напрями використання апаратів сухого очищення газів від механічних частинок пилу.
4. Охарактеризуйте фізико-механічні властивості пилу.
5. Чому недоцільно використовувати циклони для вловлювання дрібнодисперсних частинок пилу розміром менше 10 мкм?

## **ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4**

### **РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БАТАРЕЙНИХ ЦИКЛОНІВ**

**Мета роботи:** ознайомитися з принципом роботи й алгоритмом розрахунку параметрів батарейних циклонів.

**Методика розрахунку.** Батарейний пиловловлювач (мультициклон) складається з великої кількості циклонних елементів невеликого діаметра, розташованих у корпусі з єдиним підведенням і відведенням газу (рис. 5).

Батарейний циклон має корпус, поділений на декілька секцій, кожна з яких може відключатися при зміні навантаження на апарат. Найбільш поширені циклонні елементи із спрямувальними пристроями типу «гвинт» і «розетка». Зазвичай такі елементи мають діаметр 100, 150, 250 мм.

Циклонний елемент складається з корпусу, спрямувального пристрою та вихлопної труби. Елементи з пристроєм «розетка» більш ефективні, але в той же час вони більш схильні до забивання пилом, ніж елементи з пристроєм типу «гвинт».

Доцільність застосування таких установок пояснюється їх вищою ефективністю порівняно з циклонами, що мають корпус великого діаметра. Крім того, габарити батарейних циклонів (БЦ), менші, ніж розміри групи звичайних циклонів тієї самої продуктивності [5].

Розрахунок технологічних параметрів батарейного циклона виконується за описаним нижче алгоритмом.

1. Задають оптимальну швидкість потоку  $W_{opt}$  в межах 3,5...5 м/с. Нижня межа лімітується небезпекою забивання спрямувального пристрою, верхня – інтенсифікацією абразивного зношування елементів і віднесенням пилу.

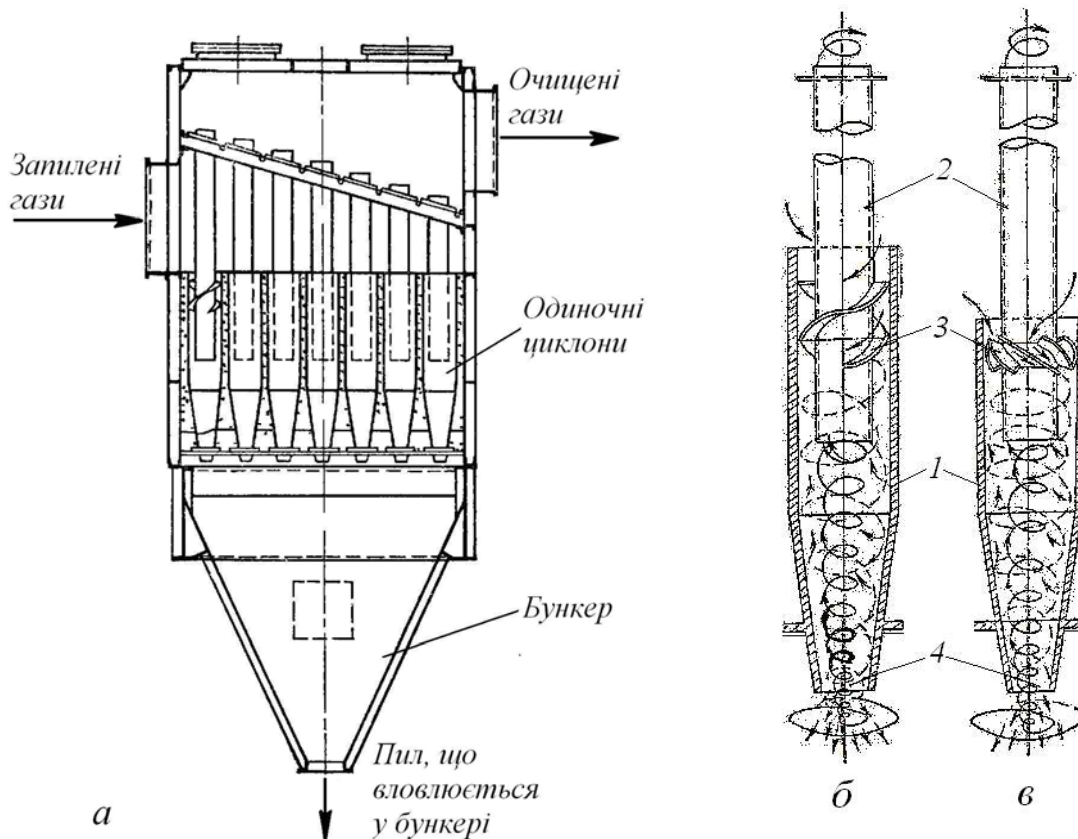


Рис. 5. Принципова схема батарейного пиловловлювача: *а* – будова й принцип дії мультициклону; *б* – елемент мультициклону із закручувальним пристроєм типу «гвинт»; *в* – елемент мультициклону із закручувальним пристроєм типу «розетка»; 1 – корпус елемента; 2 – вихлопний патрубков; 3 – закручувальний пристрій; 4 – пиловідвідний патрубков

Передбачають вивчення типової конструкції батарейного циклона такою пропускною здатністю й таким числом елементів, щоб швидкість газопилового потоку в окремому елементі не виходила за межі оптимальних значень.

2. Обчислюють втрату тиску в батарейному циклоні таким чином:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{W^2}{2} \cdot \rho \quad \text{Па}, \quad (26)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт гідравлічного опору циклонного елемента, Па;  $W$  – умовна швидкість руху газу в циклонному елементі, м/с;  $\rho$  – густина газу в робочих умовах, її визначають за такою формулою:

$$\rho = \frac{273 \cdot P}{101,325 \cdot T} \cdot \rho_0, \quad (27)$$

де  $\rho_0$  – густина газу в нормальних умовах ( $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ ).

Для пристроїв типу «гвинт»  $\xi = 85$ , а типу «Розетка»  $\xi = 90$  й  $65$  (вони мають вісім лопаток, кут нахилу яких  $\alpha = 25^\circ$  та  $30^\circ$  відповідно).

3. Визначають умовну швидкість руху газу за такою формулою:

$$W_{ум} = \frac{4 \cdot V_1}{\pi \cdot D^2} \quad \text{м/с}, \quad (28)$$

де  $V_1$  – втрата газу при його русі через один циклонний елемент у робочих умовах,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $D$  – діаметр циклонних елементів, м.

4. Розраховують витрату газу в робочих умовах, а саме:

$$V = V_0 \cdot \frac{\rho}{3600} \cdot \rho_0 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (29)$$

де  $V_0$  – кількість газу, що надходить на очищення,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

Далі обирають значення параметрів для різних типів циклонних елементів.

Для батарейних циклонів оптимальні значення умовної швидкості будуть такими:

якщо  $\xi = 85 - 90$ , то  $W_{opt} = 3,85 \text{ м/с}$ ; коли  $\xi = 65$ , то  $W_{opt} = 4,5 \text{ м/с}$ .

5. Значення умовної швидкості газу в робочих умовах не повинне відхилятися від оптимального більш ніж на  $\pm 15\%$  відповідно до такого співвідношення:

$$\Delta = \frac{W_{ум} - W_{opt}}{W_{opt}} \cdot 100\%, \quad \Delta \leq 15\%. \quad (30)$$

6. Обчислюємо витрату газу одним циклонним елементом таким чином:

$$V_1 = W_{opt} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \text{ м}^3/\text{с}, \quad (31)$$

7. Далі розраховуємо необхідну кількість циклонних елементів, а саме:

$$N = \frac{V_0}{V_1}. \quad (32)$$

На цьому етапі потрібно вибрати тип конструювання батарейного циклона, а значення необхідних для цих розрахунків параметрів  $d_{50}^T$  й  $\lg \sigma^T$  наведені в табл. 15.

Таблиця 15 – Параметри для визначення ступеня вловлювання пилу елементами батарейних циклонів

Тип уловлювального пристрою	Елемент		$d_{50}^T$ , мкм	$\lg \sigma^T$
	Кут нахилу $\alpha$ , град	Діаметр $D$ , м		
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, які на 50% вловлюються елементами батарейного циклона в робочих умовах,

$$d_{50} = d_{50}^T \cdot \left( \frac{\rho_T}{\rho} \cdot \frac{\mu}{\mu_T} \cdot \frac{W_T}{W} \right)^{0,5} \text{ мкм}, \quad (33)$$



тут величину  $d_{50}^T$ , визначають за даними табл. 13;  $\rho, \mu, W$  – параметри, які відповідають робочим умовам;  $\rho_T, \mu_T, W_T$  – параметри, відповідні прийнятим для умовного елемента батарейного циклона.

Користуючись оптимальною величиною  $d_{50}^T$ , обчислюють параметр  $X$  за формулою (12), а з додатка А беруть значення функції  $\Phi(X)$ . Обчислений ступінь уловлювання пилу елементом батарейного циклона за формулою (11) зіставляють із необхідним значенням. У разі потреби ступінь уловлювання пилу можна підвищити, зменшивши діаметр елемента батарейного циклона або вибравши більш ефективний тип спрямувального пристрою.

Коефіцієнт очищення газів у батареї, що складається з прямотечійних елементів, знижується приблизно на 10 % порівняно з ефективністю одиночного елемента і залежить при цьому від ефективності циклона.

Його величину визначають за такою формулою:

$$\eta_{\text{бат}} = \frac{0,9\eta_u\eta}{1 - 0,9\eta(1 - \eta_u)}, \quad (34)$$

де  $\eta_u$  – коефіцієнт очищення газів в останньому циклоні відсмоктувальної лінії ( $\eta_u = 0,85$ );  $\eta$  – коефіцієнт очищення в одиничному циклонному елементі [2, 5].

### **Приклад розв'язування типової задачі**

*Задача.* Розрахувати ефективність газоочищення в батарейних циклонах.

*Вихідні дані:* Температура димових газів  $T = 170^\circ\text{C}$ , динамічна в'язкість газу  $\mu = 5,63 \cdot 10^{-6}$  Па·с, тиск газу в робочих умовах  $P = 102,97$  кПа, витрата газу  $V = 42000$  м<sup>3</sup>/год; характеристика пилогазової суміші:  $d_m = 20$  мкм; щільність частинок пилу  $\rho = 2240$  кг/м<sup>3</sup>; густина димових газів у нормальних умовах  $\rho_0 = 1,293$  кг/м<sup>3</sup>; запиленість газу  $C = 42$  г/м<sup>3</sup>.

*Розв'язування.*

1. Задаємо, що значення оптимальної швидкості переміщення пилогазової суміші  $W_{\text{opt}} = 5$  м/с.

2. Визначаємо витрату газу, що проходить через один циклонний елемент, якщо діаметр його циліндричної частини  $D = 250$  мм, а саме:

$$V_1 = W_{\text{opt}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 5 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,25)^2}{4} = 5 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,25)^2}{4} = 0,245 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Обчислюємо кількість елементів у циклоні таким чином:

$$N = \frac{V_0}{V_1} = \frac{42000}{3600 \cdot 0,245} = \frac{11,67}{0,245} = 47,6 \text{ шт.}$$

Отримана величина відповідає кількості одиночних елементів у батарейних циклонах типу БЦ ( $16 \times 4 = 48$  шт.).

4. Обчислюємо швидкість потоку, що рухається через 1 елемент, тобто

$$W_{\text{opt}} = \frac{4 \cdot V_0}{N \cdot \pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 11,6}{48 \cdot 3,14 \cdot (0,25)^2} = \frac{46,4}{9,42} = 4,93 \text{ м/с}.$$

Отримане значення близьке до оптимальної швидкості (5 м/с) пилогазової суміші, що розвивається в батарейному циклоні.

5. Із табл. 16 беремо коефіцієнт гідравлічного опору в елементі ( $\xi = 90$ ) й обчислюємо густину димових газів у робочих умовах (при 170 °С)  $\rho_r$ , а саме:

$$\rho = \frac{273 \cdot P}{101,325 \cdot T} \cdot \rho_0 = \frac{273 \text{ К} \cdot 102,97 \text{ кПа}}{101,325 \text{ кПа} \cdot 443 \text{ К}} \cdot 1,293 \text{ кг/м}^3 = 0,81 \text{ кг/м}^3.$$

Таблиця 16 – Технічні характеристики батарейних циклонів із зворотно-течійними елементами

Марка цикло-на	Кіль-кість елемен-тів, шт.	Оптималь-на швид-кість газів в елементі, $W_{\text{опт}}$ , м/с	Пропуск-на здатність $V$ , м <sup>3</sup> /с	Коефі-цієнт опору $\xi$ , кПа	Тип спряму-вально-го при-строю	Напря-м застосування
ЦБ-254Р	25, 30, 40, 50, 60, 80	4,5	5,5...16	90	Розетка	Очищення високо-температурних га-зів (до $t = 400^\circ\text{C}$ ) від золи й пилу
БЦ-2	20, 25, 30, 36, 42, 46	4,5	4,2; 5,25; 6,3; 7,55; 9,2; 11,7	65	Розетка	Очищення від не-займистого й пожежонебезпеч-ного пилу
ПБЦ	24, 36, 48, 92, 116, 140	3,5	3,3; 7,0; 9,7; 13,9; 20,8; 27,8	120	Напів-завит-ковий	Очищення від не-безпечних аерозо-лів з температурою

Таблиця 17 – Робочі характеристики циклонних елементів

Параметр	Тип спрямувальних пристроїв				
	«розетка» $a = 25^\circ$ , $D = 250$ мм	«розетка» $a = 30^\circ$ , $D = 250$ мм	«Енерго-вугілля» $D = 250$ мм	«Енерго-вугілля» $D = 250$ мм	Прямотечійний ЦКПІ $D = 250$ мм
$d_{50}^T$ , мкм	3,85	5	3	2,85	4
$\lg \sigma_\eta$	0,46	0,46	0,325	0,325	0,325

*Примітка.* 1. Дані, що відносяться до циклонних елементів з пристроями типу «розетка» та «Енерговугілля», відповідають таким умовам їх роботи: середня швидкість потоку в елементі  $W_T = 4,5$  м/с; динамічна в'язкість газів  $\mu_T = 23,7 \cdot 10^{-6}$  Па·с; щільність частинок  $\rho_T = 2200$  кг/м<sup>3</sup>.

2. До параметрів, що визначають ефективність прямотечійного елемента ЦКПІ, відносять такі: швидкість потоку  $W_T = 12$  м/с; динамічна в'язкість газів  $\mu_T = 18,8 \cdot 10^{-6}$  Па·с; щільність часток  $\rho_T = 2200$  кг/м<sup>3</sup>.

6. Визначаємо втрати тиску в циклоні таким чином:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{W^2}{2} \cdot \rho = 90 \cdot \frac{(4,93)^2}{2} \cdot 0,81 = 886 \text{ Па.}$$

Величина втрати тиску в циклоні прийнятна такою, що відповідає цьому параметру для тягодуттєвих пристроїв типових котелень.

7. За даними з табл. 17 визначаємо, що  $d_{50} = 3,85$  мкм й  $\lg \sigma_\eta = 0,46$ . Це технологічні параметри елемента із спрямувальним пристроєм типу «розетка», кут нахилу лопаток (завихрювачів) у якому становить  $25^\circ$ .

Обчислюємо значення параметра  $d_{50}$  для робочих умов (з урахуванням діаметра циклона, швидкості потоку, щільності пилу, динамічної в'язкості газу) за таким рівнянням:

$$d_{50} = d_{50}^T \cdot \left( \frac{\rho_T}{\rho} \cdot \frac{\mu}{\mu_T} \cdot \frac{W_T}{W} \right)^{0,5} = 3,85 \cdot \sqrt{\frac{2200}{2240} \cdot \frac{5,63 \cdot 10^{-6}}{23,7 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{4,5}{4,93}} = 3,85 \cdot 0,462 = 1,78 \text{ мкм,}$$

де  $d_{50}^T$  – розмір частинок, здатних вловлюватись умовним циклоном на 50 %;

$\rho_T, \mu_T, W_T$  – параметри, величина кожного з яких характеризує роботу умовного циклона.

8. Розраховуємо параметр  $X$  таким чином:

$$X = \frac{\lg \left( \frac{d_{pj}}{d_{50}} \right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta^T + \lg^2 \sigma_\eta}} = \frac{\lg \left( \frac{20}{1,78} \right)}{\sqrt{(0,46)^2 + (0,405)^2}} = \frac{1,05}{\sqrt{0,2116 + 0,164025}} = \frac{1,05}{0,613} = 1,713,$$

тут  $d_{pj}$  – розмір частинок пилу  $j$ -ї фракції у викидах, мкм;  $\lg \sigma_\eta$  – ступінь полідисперсності пилу. Значення параметрів  $d_{50}$  і  $\lg \sigma_\eta$  що характеризують деякі види пилу, наведено в табл. 7.

У додатку А знаходимо, що параметр  $\Phi(X) = 0,9554$ , тобто, ефективність очищення викиду від часток пилу розміром 20 мкм у робочому елементі батарейного циклона становить 95,54 %.

9. Обчислюємо загальну ефективність очищення газопилової суміші в батареї, ураховуючи, що коефіцієнт очищення газів в останньому циклоні відсмоктувальної лінії  $\eta_u = 0,85$ , а саме:

$$\eta_{\text{бат}} = \frac{0,9 \eta_u \eta}{1 - 0,9 \eta (1 - \eta_u)} = \frac{0,9 \cdot 0,85 \cdot 0,9554}{1 - 0,9 \cdot 0,9554 (1 - 0,85)} = \frac{0,731}{0,871} = 0,839.$$

Таким чином, загальна ефективність очищення викиду в батарейному циклоні  $\eta_{\text{бат}} = 83,9$  %.

### **Контрольне завдання**

1. Розрахувати ефективність очищення газів у батарейному циклоні відповідно до варіанта завдання, наведеного в табл. 18. Решту параметрів для розрахунку взяти з вихідних даних у розглянутій вище типовій задачі.

Таблиця 18 – Вихідні дані для розрахунку батарейного циклона

№ вар.	Запиленість газу $C_{вх}$ , г/м <sup>3</sup>	Витрата газоповітряної суміші $V$ , м <sup>3</sup> /год	Щільність частинок пилу $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	№ вар.	Запиленість газу $C_{вх}$ , г/м <sup>3</sup>	Витрата газоповітряної суміші $V$ , м <sup>3</sup> /год	Щільність частинок пилу $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	5,0	21000	1550	11	12,0	50000	1600
2	5,2	29000	1600	12	13,2	60000	1650
3	6,3	43000	1650	13	14,5	70000	1680
4	6,7	48000	1680	14	15,0	80000	1700
5	7,0	58000	1700	15	16,5	20000	1600
6	7,5	69000	1600	16	17,7	30000	1680
7	8,8	80000	1680	17	18,8	40000	1800
8	9,0	20000	1800	18	19,0	50000	1700
9	10,3	30000	1700	19	20,0	60000	1550
10	11,5	40000	1550	20	21,5	70000	1600

*Примітка.* Номер варіанта кожен студент обирає за своїм порядковим номером у списку академічної групи.

### **Питання для самоконтролю**

1. Опишіть схему будови батарейного циклона та принцип його роботи.
2. У чому полягає перевага батарейних циклонів перед звичайними одиничними?
3. Назвіть основні напрями використання апаратів сухого очищення газів від механічних частинок пилу.
4. Які вихідні дані використовують у технологічних розрахунках параметрів батарейних циклонів?

## **ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5**

### **РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ВЕРТИКАЛЬНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ СКРУБЕРІВ**

**Мета роботи:** Розрахувати фракційну й загальну ефективність вертикального аерозольного скрубера.

**Методика розрахунку.** В аерозольних скруберах запилені гази пропускають через завісу розпилюваної рідини. При цьому частинки пилу захоплюються краплинами промивної рідини й осаджуються в промивачі, а очищені гази видаляються з апарата. У протитечійному газопромивнику (рис. 6) краплини з форсунок подають назустріч запиленому потоку газів. Вони повинні бути настільки великими, щоб не виносились газовим потоком, швидкість якого стано-

виль від 0,6 до 1,2 м/с. У разі перевищеної зазначеної межі після газопромивника необхідно встановлювати краплевловлювач.

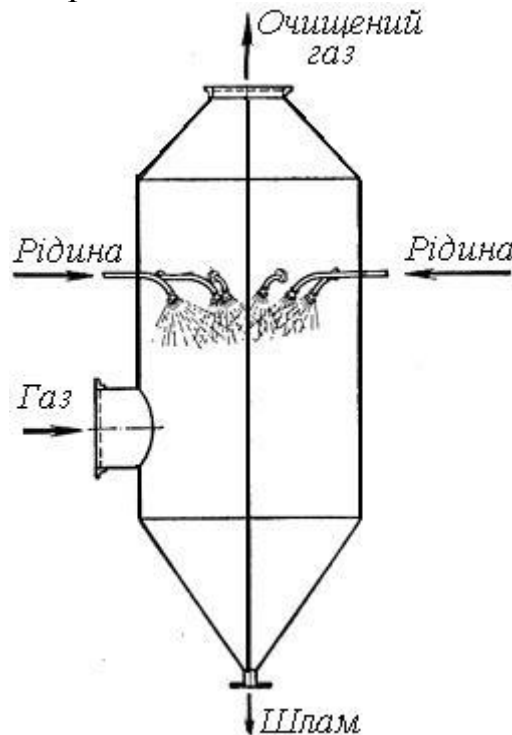


Рис. 6. Схема будови й роботи вертикального аерозольного скрубера

Вміст пилу у викиді після очищення в аерозольному скрубелі (від 0 до 1) обчислюється за такою формулою:

$$Pt_d = \exp\left(-\frac{3Q_L V_{td} z \eta_d}{4Q_G r_d (V_{td} - V_G)}\right) = \exp\left(-\frac{A_d V_{td} \eta_d}{Q_G}\right) \%, \quad (35)$$

де  $Q_L$  – об’ємна витрата рідини, м<sup>3</sup>/с;  $Q_G$  – об’ємна витрата газу, м<sup>3</sup>/с;  $V_G$  – поверхнева швидкість переміщення газу, см/с;  $V_{td}$  – кінцева швидкість осадження крапель рідини, см/с (рис. 7);  $\eta_d$  – ефективність уловлювання окремої фракції пилу (від 0 до 1);  $r_d$  – радіус крапель, см;  $z$  – довжина контактної зони в скрубелі, см;  $A_d$  – площа поверхні всіх крапель у скрубелі, см<sup>2</sup>, яку визначають за такою формулою:

$$A_d = \frac{3Q_L z}{4r_d (V_{td} - V_G)}. \quad (36)$$

Фракційну ефективність уловлювання розраховують таким чином:

$$\eta_d = \left(\frac{K_p}{K_p + 0,7}\right)^2. \quad (37)$$

Коефіцієнт  $K_p$ , що враховує ефект інерційного зіткнення частинок пилу з краплями рідини, обчислюють за таким співвідношенням:

$$K_p = \frac{C\rho_p d_p^2 V_{p,d}}{9\mu_G d_d} = \frac{\rho_w d_a^2 V_{p,d}}{9\mu_G d_d}, \quad (38)$$

де  $C$  – поправковий коефіцієнт Каннінгема, безрозмірний (табл. 19);  $\rho_p$  – щільність частинок, г/см<sup>3</sup>;  $d_p$  – фізичний діаметр частинок, см;  $V_{p,d}$  – швидкість руху частинок (по відношенню до крапель), см/с;  $d_d$  – діаметр крапель, см;  $\mu_G$  – опір газового середовища, г/см·с (табл. 20);  $d_a$  – аеродинамічний діаметр частинки, см;  $\rho_w$  – густина води, г/см<sup>3</sup>.

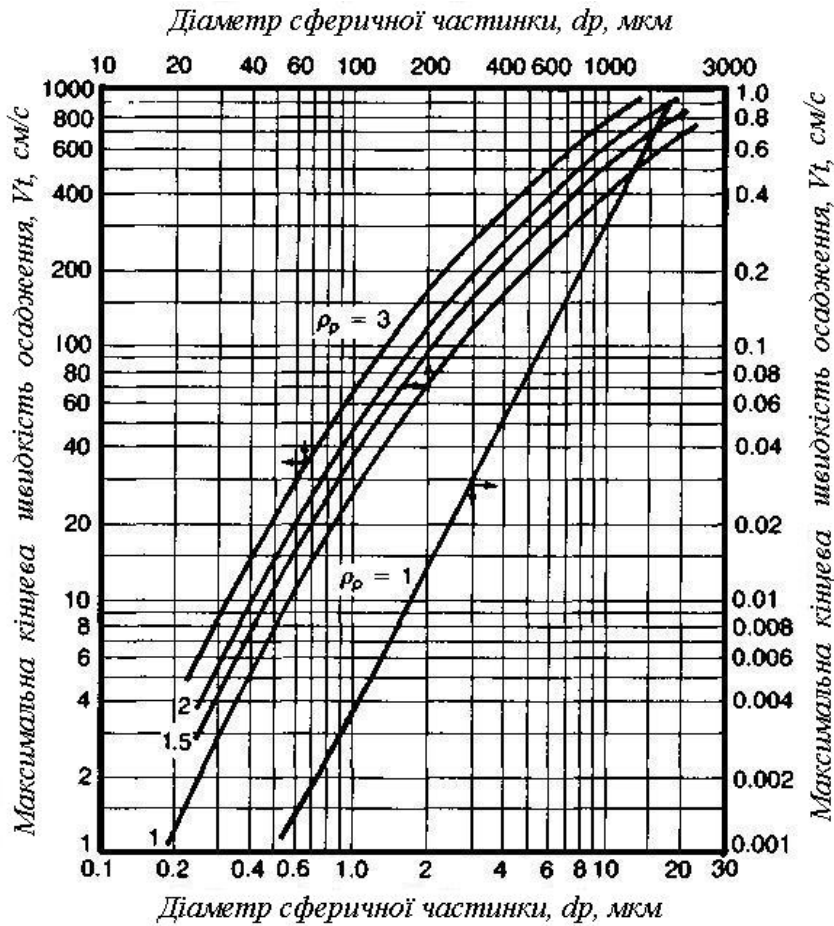


Рис. 7. Значення максимальної швидкості осадження частинок [4]

Таблиця 19 – Залежність коефіцієнта Каннінгема  $C$  від розміру частинок  $d_p$

$d_p$ , мкм	$C$	$d_p$ , мкм	$C$	$d_p$ , мкм	$C$	$d_p$ , мкм	$C$
0,01	22,5	0,10	2,89	1,0	1,166	5,0	1,033
0,05	5,02	0,50	1,334	2,0	1,083	10,0	1,017

*Примітка.* Для частинок пилу, фізичний розмір яких  $d_p \geq 10$  мкм, поправковий коефіцієнт Каннінгема  $C = 1$ .

Аеродинамічний діаметр частинки  $d_a$  визначається як діаметр сфери, що має таку саму швидкість осадження, як і фізична частинка, щільність якої  $\rho_p = \rho_w = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, та розраховується за такою формулою:

$$d_a = \sqrt{\frac{18 \mu v_t}{C \rho_w g}} \text{ м}, \quad (39)$$

де  $\mu$  – в'язкість газу, кг/м·с;  $v_t$  – гранична швидкість осідання частинки, м/с;  $\rho_w$  – густина води, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – гравітаційне прискорення, г/с<sup>2</sup>.

Таблиця 20 – Значення в'язкості повітря залежності від температури

Температура, $t, ^\circ\text{C}$	В'язкість $\mu$		
	фунт/фут·год	кг/м·год	г/см·с
10	0,043	0,064	0,000178
20	0,044	0,065	0,000181
30	0,045	0,067	0,000186
40	0,047	0,070	0,000194
50	0,048	0,071	0,000198
60	0,048	0,071	0,000198
70	0,050	0,074	0,000207
80	0,051	0,076	0,000211
90	0,052	0,077	0,000215
100	0,053	0,079	0,000219

У вертикальних скруберах швидкість переміщень частинок по відношенню до крапель відповідає кінцевій швидкості осадження крапель рідини, тобто  $V_{p,d} = V_{t,d}$  [4].

Загальну ефективність скрубера  $\eta_{заг}$ , %, можна обчислити за формулою (14), а викид в атмосферу частинок пилу  $P$ , %, за формулою (15).

### Приклад розв'язування типової задачі

**Задача.** Розрахувати вміст фракції пилу розміром 5 мкм у викидах після очищення у вертикальному скрубєрі за таких технологічних умов:  $Q_L / Q_G = 1 \text{ л/м}^3$  або  $0,001 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; поверхнева швидкість газу  $V_G = 20 \text{ см/с}$ ;  $d_d = 300 \text{ мкм}$ ;  $z = 300 \text{ см}$ ;  $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $V_{td} = 120 \text{ см/с}$  (визначається за номограмами осадження частинок залежно від їх щільності та діаметра;  $\mu_G = 0,074 \text{ кг/м}\cdot\text{год} = 0,000206 \text{ г/см}\cdot\text{с}$ ;  $\rho_p = 1,5 \text{ г/см}^3$ ).

*Розв'язування*

1. Визначаємо аеродинамічний діаметр частинок  $d_a$  таким чином:

$$d_a = \sqrt{\frac{18\mu v_t}{C\rho_w g}} = \sqrt{\frac{18 \cdot 0,074 \text{ кг/м}\cdot\text{год} \cdot 0,3 \text{ см/с} \cdot 0,01 \text{ см/м}}{3600 \text{ с/год} \cdot 1,033 \cdot 1000 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2}} = \sqrt{\frac{0,003996}{36481428}} =$$

$$\sqrt{1,095e^{-10}} = 1,047 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 10,47 \text{ мкм}.$$

2. Обчислюємо значення коефіцієнта  $K_p$ , тобто

$$K_p = \frac{C\rho_p d_p^2 V_{p,d}}{9\mu_G d_d} = \frac{1,033 \cdot 1,5 \text{ г/см}^3 \cdot (0,0005 \text{ см})^2 (120 \text{ см/с})}{9 \cdot 0 \cdot (0,000206 \text{ г/см}\cdot\text{с}) (0,030 \text{ см})} = \frac{0,000046485}{0,00005562} = 0,84.$$

3. Визначаємо фракційну ефективність скрубєра, а саме:

$$\eta_d = \left( \frac{K_p}{K_p + 0,7} \right)^2 = \left( \frac{0,84}{0,84 + 0,7} \right)^2 = 0,298, \text{ тобто } 29,8 \%$$

4. Розраховуємо вміст частинок пилу у викиді таким чином:

$$Pt_d = \exp \left( - \frac{3Q_L V_{td} z \eta_d}{4Q_G r_d (V_{td} - V_G)} \right) = \exp \left( - \frac{3(0,001)(120)(300)(0,298)}{4(0,015)(120 - 20)} \right) =$$

$$= 2,718^{\left( \frac{32,132}{6} \right)} = 2,718^{(-5,355)} = 0,00473 \text{ або } 0,47\%$$

Отже, ефективність уловлювання частинок пилу діаметром 5 мкм становить 99,53 %.

### **Контрольне завдання**

1. Розрахувати загальну ефективність очищення газів в аерозольному скрубєрі відповідно до варіанта завдання, наведеного в табл. 21.

Таблиця 21 – Вихідні дані для розрахунку аерозольного скрубєра

№ вар.	Поверхнева швидкість газу $V_G$ , см/с	Кінцева швидкість осадження крапель $V_{td}$ , см/с	Довжина контактної зони в скрубєрі $z$ , см	№ вар.	Поверхнева швидкість газу $V_G$ , см/с	Кінцева швидкість осадження крапель $V_{td}$ , см/с	Довжина контактної зони в скрубєрі $z$ , см
1	20	120	300	11	25	130	320
2	25	125	320	12	30	115	330
3	30	130	330	13	40	110	340
4	15	115	340	14	35	135	350
5	25	110	350	15	30	130	360
6	30	135	360	16	20	125	380
7	40	130	380	17	25	120	300
8	35	125	400	18	30	125	320
9	30	120	280	19	25	130	330
10	20	125	300	20	30	115	340

*Примітка.* Номер варіанта кожен студент обирає за своїм порядковим номером у списку академічної групи.

### **Питання для самоконтролю**

1. Опишіть схему аерозольного скрубєра та принцип його роботи.
2. У чому полягає перевага аерозольних скрубєрів перед апаратами сухого очищення газів?
3. Назвіть основні сфери й напрями використання апаратів мокрого очищення газів від механічних частинок пилу.



## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6

### РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ СКРУБЕРІВ ВЕНТУРІ

**Мета роботи:** Розрахувати фракційну й загальну ефективність скрубера Вентурі.

**Методика розрахунку.** У скруберах Вентурі (рис. 8) використовується ефект інерційного зіткнення зважених частинок пилу з поверхнею крапель рідини, сформованих у газовому середовищі шляхом диспергування. Розвиваючи велику швидкість, газовий потік зіштовхується з аерозольним потоком рідини, яка також під тиском подається в газохід.

Скрубери Вентурі набули широкого застосування серед апаратів мокрого очищення газів з осадженням частинок пилу на поверхні крапель рідини. Ефективність очищення викидів від пилу із середнім розміром частинок 1...2 мкм у таких спорудах становить 96...98 % при початковій концентрації до 100 г/м<sup>3</sup>. До того ж питома витрата води на зрошення становить 0,4...0,6 л/м<sup>3</sup> [1].

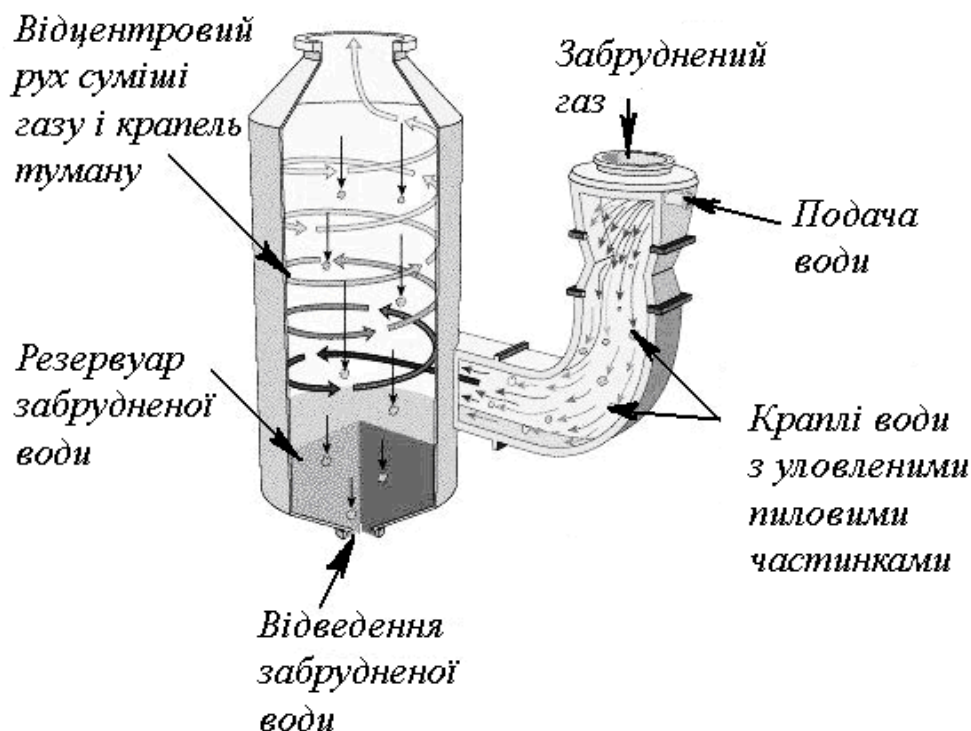


Рис. 8 Принципова схема будови й роботи скрубера Вентурі

Вміст пилу у викиді обчислюється за такою формулою:

$$Pt_d = \exp \left\{ \frac{Q_L V_G \rho_L d_d}{55 Q_G \mu_G} \left[ -0,7 - K_p f + 1,4 \ln \left( \frac{K_p f + 0,7}{0,7} \right) + \frac{0,49}{0,7 + K_p f} \right] \cdot \frac{1}{K_p} \right\}, \quad (40)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт, що враховує інерційне зіткнення частинок пилу;  $f$  – емпіричний коефіцієнт ( $f = 0,25$  для гідрофобних частинок;  $f = 0,50$  для гідрофільних частинок).

Коефіцієнт  $K_p$  розраховують таким чином:

$$K_p = \frac{C\rho_p d_p^2 V_{p,d}}{9\mu_G d_d} = \frac{\rho_w d_a^2 V_{p,d}}{9\mu_G d_d}, \quad (41)$$

де  $C$  – поправковий коефіцієнт Каннінгема, (табл. 22);  $\rho_p$  – щільність частинок, г/см<sup>3</sup>;  $d_p$  – фізичний діаметр частинок, см;  $V_{p,d}$  – швидкість руху частинок (по відношенню до крапель), см/с;  $d_d$  – діаметр крапель, см;  $\mu_G$  – опір газового середовища, г/см·с;  $d_a$  – аеродинамічний діаметр частинки, см;  $\rho_w$  – густина води, г/см<sup>3</sup>.

Таблиця 22 – Залежність коефіцієнта Каннінгема  $C$  від розміру частинок  $d_p$

$d_p$ , мкм	$C$	$d_p$ , мкм	$C$	$d_p$ , мкм	$C$	$d_p$ , мкм	$C$
0,01	22,5	0,10	2,89	1,0	1,166	5,0	1,033
0,05	5,02	0,50	1,334	2,0	1,083	10,0	1,017

Аеродинамічний діаметр частинки пилу  $d_a$  визначають за формулою (39).

Діаметр крапель  $d_d$  обчислюють за таким виразом:

$$d_d = \frac{58600}{V_G} \left( \frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0.5} + 597 \left( \frac{\mu_L}{(\sigma \cdot \rho_L)^{0.5}} \right)^{0.45} \cdot \left( 1000 \frac{Q_L}{Q_G} \right)^{1.5}, \quad (42)$$

де  $\rho_L$  – густина рідини, г/см<sup>3</sup>;  $\sigma$  – поверхневий натяг рідини, дин/см;  $\mu_L$  – в'язкість рідкого середовища, г/см·с (табл. 23).

Таблиця 23 – Значення в'язкості води залежності від її температури

Температура, $t$ , °C	В'язкість $\mu_L$ , мПа·с	В'язкість $\mu_L$ , г/см·с	Поверхневий натяг $\sigma$ , Н/м	Поверхневий натяг $\sigma$ , дин/см
10	1,308	0,01308	0,07422	74,22
20	1,002	0,01002	0,07275	72,75
30	0,7978	0,007978	0,07118	71,18
40	0,6531	0,006531	0,06956	69,56
50	0,5471	0,005471	0,06791	67,91
60	0,4668	0,004668	0,06618	66,18
70	0,4044	0,004044	0,06440	64,40
80	0,3550	0,003550	0,06260	62,60
90	0,3150	0,003150	0,06080	60,80
100	0,2822	0,002822	0,05890	58,90

### Приклад розв'язування типової задачі

*Задача.* У зв'язку з необхідністю доочищення (після проходження через батарейні циклони) промислових газів від дрібних частинок азбестового типу ( $d_p = 1$  мкм) розрахувати ефективність їх уловлювання за таких технологічних

умов:  $Q_L / Q_G = 1 \text{ л/м}^3$  або  $0,001 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; поверхнева швидкість газу  $V_G = 50 \text{ м/с}$ ;  $f = 0,50$ . Причому за нормальних умов (атмосферний тиск,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) поверхневий натяг рідини  $\sigma = 72,75 \text{ дин/см}$ ,  $\mu_L = 0,01002 \text{ г/см}\cdot\text{с}$ ;  $\mu_G = 0,00018 \text{ г/см}\cdot\text{с}$ ;  $\rho_L = 1,0 \text{ г/см}^3$ .

### Розв'язування

1. Знайдемо діаметр крапель, що утворюються в скрубєрі таким чином:

$$d_d = \frac{58600}{V_G} \left( \frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0.5} + 597 \left( \frac{\mu_L}{(\sigma \cdot \rho_L)^{0.5}} \right)^{0.45} \cdot \left( 1000 \frac{Q_L}{Q_G} \right)^{1.5} =$$

$$= \frac{58600}{50 \text{ м/с} \cdot 100 \text{ см/м}} \left( \frac{72 \text{ дин/см}}{1 \text{ г/см}^3} \right)^{0.5} + 597 \left( \frac{0,01002 \text{ г/см}\cdot\text{с}}{\sqrt{72 \text{ дин/см} \cdot 1 \text{ г/см}^3}} \right)^{0.45} \cdot (1000 \cdot 0,001 \text{ м}^3/\text{м}^3)^{1.5} =$$

$$= 99,4 + 28,7 = 128,1 \text{ мкм.}$$

2. Обчислюємо величину коефіцієнта  $K_p$ , що враховує умови інерційного зіткнення частинок із краплями рідини, а саме:

$$K_p = \frac{C \rho_p d_p^2 V_{p,d}}{9 \mu_G d_d} = \frac{1,166 \cdot 1,5 \text{ г/см}^3 \cdot (0,0001 \text{ см})^2 \cdot 50 \text{ м/с} \cdot 100 \text{ см/м}}{9 \cdot 0,00018 \text{ г/(см}\cdot\text{с)} \cdot 0,0128 \text{ см}} = \frac{0,00008745}{0,000020736} = 4,22.$$

3. Знайдемо коефіцієнт віднесення для різних фракцій пилу, тобто

$$Pt_d = \exp \left\{ \frac{Q_L V_G \rho_L d_d}{55 Q_G \mu_G} \left[ -0,7 - K_p f + 1,4 \ln \left( \frac{K_p f + 0,7}{0,7} \right) + \frac{0,49}{0,7 + K_p f} \right] \cdot \frac{1}{K_p} \right\} =$$

$$\exp \left\{ \frac{0,001 \text{ м}^3}{55 \text{ м}^3} \cdot \frac{50 \text{ м/с} \cdot 100 \text{ см/м} \cdot 1 \text{ г/см}^3 \cdot 0,0128 \text{ см}}{0,00018 \text{ г/см}\cdot\text{с}} \left[ -0,7 - 4,22 \cdot 0,5 + 1,4 \ln \left( \frac{4,22 \cdot 0,5 + 0,7}{0,7} \right) + \frac{0,49}{0,7 + 4,22 \cdot 0,5} \right] \cdot \frac{1}{4,22} \right\} = \exp \{ 6,46 [-0,7 - 2,11 + 1,9 + 0,174] \cdot 0,237 \} = 2,718^{-1,127} = 0,324.$$

Отже, ефективність уловлювання частинок діаметром 1 мкм дорівнює 0,676 або 67,6 %.

### Контрольне завдання

1. Розрахувати загальну ефективність очищення газів у скрубєрі Вентурі відповідно до варіанта завдання, наведеного в табл. 24.

### Питання для самоконтролю

1. Опишіть будову скрубєра Вентурі та принцип його роботи.
2. У чому полягає перевага скрубєрів Вентурі перед іншими апаратами мокрого очищення газів?
3. Назвіть основні напрями використання апаратів мокрого очищення газів від механічних частинок пилу.

Таблиця 24 – Вихідні дані для розрахунку ефективності скрубера Вентурі

№ вар.	Швидкість газу $V_G$ , см/с	В'язкість $\mu_L$ , г/см·с	Поверхневий натяг $\sigma$ , дин/см	№ вар.	Швидкість газу $V_G$ , см/с	В'язкість $\mu_L$ , г/см·с	Поверхневий натяг $\sigma$ , дин/см
1	50	0,004044	64,40	11	50	0,004044	64,40
2	45	0,01002	72,75	12	45	0,01002	72,75
3	35	0,007978	71,18	13	35	0,007978	71,18
4	55	0,006531	69,56	14	55	0,006531	69,56
5	60	0,005471	67,91	15	60	0,005471	67,91
6	65	0,004668	66,18	16	65	0,004668	66,18
7	70	0,004044	64,40	17	70	0,004044	64,40
8	75	0,003550	62,60	18	75	0,003550	62,60
9	80	0,003150	60,80	19	80	0,003150	60,80
10	50	0,002822	58,90	20	50	0,002822	58,90

*Примітка.* Номер варіанта кожен студент обирає за своїм порядковим номером у списку академічної групи.

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 7

### РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ТКАНИННИХ ФІЛЬТРІВ

**Мета роботи:** Розрахувати параметри роботи тканинних фільтрів, призначених для тонкого очищення технологічних газів від пилу

**Методика розрахунку.** Тканинні рукавні фільтри (рис. 9, а) здатні очищувати неагресивні, невибухонебезпечні та не схильні до злипання й утворення конденсату газопилової суміші від твердих частинок при температурі до 300°C. Фільтрувальним матеріалом у цих фільтрах слугують різні тканини (бавовняні, шерстяні, нітроніві, лавсанові тощо) високої міцності й підвищеної теплової та хімічної стійкості. Товщина волокон фільтрувальної тканини становить 100...150 мкм, відстань між волокнами – 50...75 мкм (рис. 9, б).

На початковому етапі експлуатації ефективність фільтра відносно низька, тому що значна кількість твердих частинок пилу проходить через пори тканини. Однак, унаслідок зіткнення частинок пилу з поверхнею тканини утворюється пиловий шар, що поступово закупорює простір між волокнами. Коли просвіти в тканині повністю заповнюються частинками й поверхня фільтра покривається шаром пилу, ефективність фільтрування поступово збільшується [6]. Утворений шар сам по собі являє собою відмінний фільтр, але він створює проблеми, пов'язані з аеродинамічним опором і різницею тисків на вході у фільтр і й на виході з нього. Таким чином, аеродинамічний опір є основним параметром

при розрахунку фільтрів, від якого залежить його ефективність, і характеристика димотяга.

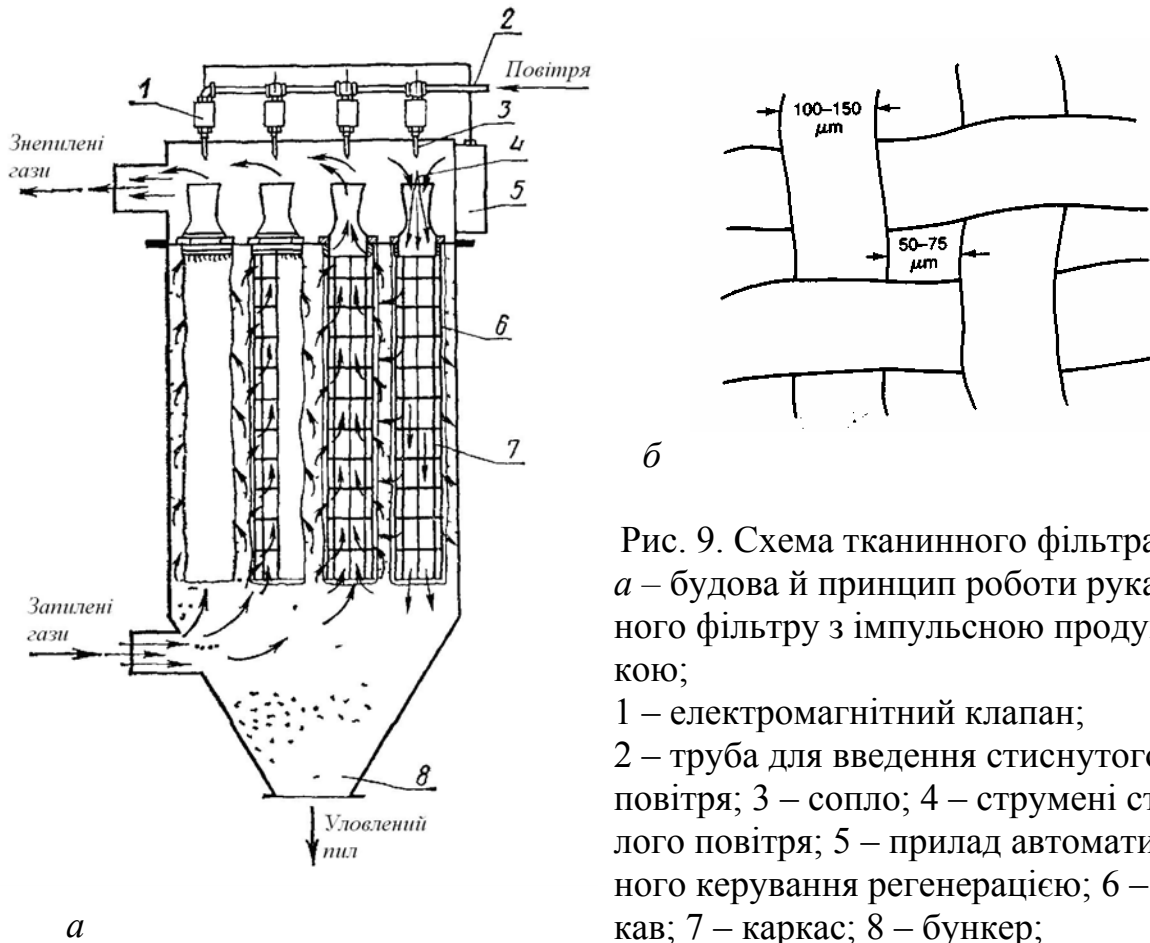


Рис. 9. Схема тканинного фільтра [7]:  
*a* – будова й принцип роботи рукав-ного фільтру з імпульсною продув-кою;  
 1 – електромагнітний клапан;  
 2 – труба для введення стиснутого повітря; 3 – сопло; 4 – струмені стис-лого повітря; 5 – прилад автоматич-ного керування регенерацією; 6 – ру-кав; 7 – каркас; 8 – бункер;  
*б* – схема розміщення волокон фільт-рувального пристрою

Різницю між показниками тиску на вході у фільтр та на виході з нього розраховують за такою формулою:

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_p + \Delta P_s, \quad (43)$$

де  $\Delta P$  – загальне падіння тиску,  $\text{Н/м}^2$ ;  $\Delta P_f$  – падіння тиску, пов'язане із проходженням газового потоку через тканину,  $\text{Н/м}^2$ ;  $\Delta P_p$  – падіння тиску, зумовлене проходженням газового потоку через шар частинок пилу,  $\text{Н/м}^2$ ;  $\Delta P_s$  – падіння тиску, викликане структурними особливостями фільтра,  $\text{Н/м}^2$ .

Величина параметра  $\Delta P_s$  звичайно вважається незначною, тому її можна не враховувати.

Рух потоку через пористе середовище можливий при дотриманні таких умов:

$$\Delta P_f = \frac{D_f \cdot \mu \cdot V}{60K_f}; \quad (44)$$

$$\Delta P_p = \frac{D_p \cdot \mu \cdot V}{60K_p}, \quad (45)$$

де  $D_f$  та  $D_p$  – товщина фільтра й шару частинок пилу відповідно в напрямку газового потоку, м;  $\mu$  – опір газового середовища, кг/с;  $V$  – поверхнева швидкість фільтрації, м/хв;  $K_f$  та  $K_p$  – коефіцієнти проходження газового потоку через фільтр і через шар твердих частинок пилу, м<sup>2</sup>; 60 – коефіцієнт перерахунку хвилин у секунди.

Поверхнева швидкість фільтрації може бути виражена таким співвідношенням:

$$V = \frac{Q}{A}, \quad (46)$$

де  $Q$  – витрата газоповітряної суміші, м<sup>3</sup>/хв;  $V$  – площа фільтра, м<sup>2</sup>.

Із часом величина  $D_p$  зростає відповідно до такого виразу:

$$D_p = \frac{L \cdot V \cdot t}{\rho_L}, \quad (47)$$

де  $L$  – вміст пилу в газоповітряній суміші, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – розрахунковий час роботи фільтра між регенераціями, хв;  $\rho_L$  – об'ємна щільність шару пилових частинок, кг/м<sup>3</sup>.

Підставляючи значення  $D_p$  у рівняння (45), одержуємо таку величину падіння тиску у фільтрі:

$$\Delta P = \left( \frac{D_f \mu}{60 K_f} \right) V + \left( \frac{\mu}{60 K_p \rho_L} \right) (LVt) V. \quad (48)$$

Таким чином, опір фільтра

$$S = \frac{\Delta P}{V} \text{ Н} \cdot \text{хв}/\text{м}^3 \text{ або } \text{Па} \cdot \text{хв}/\text{м}. \quad (49)$$

Причому поверхнева щільність шару пилових частинок [4]:

$$W = LVt. \quad (50)$$

### **Приклад розв'язування типової задачі**

*Задача.* З огляду на потребу в доочищенні (після звільнення від крупних і середніх фракцій пилу в апаратах циклонного типу) газоповітряної суміші від пилу, розрахувати параметри роботи тканинних фільтрів з метою забезпечення санітарних норм якості атмосферного повітря, беручи до уваги такі вихідні дані: вміст пилу  $L = 1,0$  г/м<sup>3</sup>,  $V = 0,9$  м/хв. Довжина фільтра  $l = 2,5$  м, радіус внутрішнього перетину  $r = 7,5$  см, товщина тканини  $D_f = 1,5$  мм = 0,0015 м; витрата газоповітряної суміші  $Q = 120$  м<sup>3</sup>/хв.; об'ємна щільність шару пилу на рукаві  $\rho = 1500$  кг/м<sup>3</sup>;  $K_f = 2500$  мкм<sup>2</sup> (50x50 мкм);  $K_p = 100$  мкм<sup>2</sup> (10x10 мкм);  $\mu = 0,095$  кг/м·с;  $t = 46$  хв.

У розрахунку належить визначити кількість рукавів, необхідних для очищення від пилу, падіння тиску у фільтрі; опір фільтру та поверхневу щільність шару пилових часток.

### *Розв'язування*

1. Визначаємо такі величини: поверхневу швидкість фільтрації через один рукав та площу рукава, тобто

$$A = 2\pi r l = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,075 \cdot 2,5 = 1,1775 \text{ м}^2.$$

Об'єм суміші, що проходить через один рукав,

$$Q^* = A \cdot V = 1,1775 \text{ м}^2 \cdot 0,9 \text{ м/хв} = 1,06 \text{ м}^3 / \text{хв}.$$

Кількість фільтрувальних рукавів

$$n = \frac{Q}{Q^*} = \frac{120}{1,06} \approx 113.$$

2. Розраховуємо величину шару пилу в момент струшування фільтра таким чином:

$$D_p = \frac{L \cdot V \cdot t}{\rho_L} = \frac{0,001 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,9 \text{ м/хв} \cdot 46 \text{ хв}}{1500 \text{ кг/м}^3} = 0,0000276 \text{ м} = 27,6 \text{ мкм}.$$

3. Рух потоку через пористе середовище відбувається за таких умов:

$$\Delta P_f = \frac{D_f \cdot \mu \cdot V}{60 K_f} = \frac{0,0015 \text{ м} \cdot 0,095 \text{ кг/м} \cdot \text{с} \cdot 0,9 \text{ м/хв}}{60 \text{ с/хв} \cdot 2500 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 \cdot 3600 \text{ с/год}} = \frac{0,00012825}{0,00054} = 0,238 \text{ Н/м}^2;$$

$$\Delta P_p = \frac{D_p \cdot \mu \cdot V}{60 K_p} = \frac{0,0000276 \text{ м} \cdot 0,095 \text{ кг/м} \cdot \text{с} \cdot 0,9 \text{ м/хв}}{60 \text{ с/хв} \cdot 100 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2} = \frac{2,3598 \cdot 10^{-6}}{0,006 \cdot 10^{-6}} = 393 \text{ Н/м}^2.$$

$$\Delta P \approx 393 \text{ Н/м}^2 = 393 \text{ Па}.$$

4. Обчислюємо опір фільтра, а саме:

$$S = \frac{\Delta P}{V} = \frac{393}{0,9} = 437 \text{ Н} \cdot \text{хв/м}^3 = \text{Па} \cdot \text{хв/м}.$$

5. Визначаємо поверхневу щільність шару пилових частинок, тобто:

$$W = LVt = 0,001 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,9 \text{ м/хв} \cdot 46 \text{ хв} = 0,0414 \text{ кг/м}^2.$$

### ***Контрольне завдання***

1. Розрахувати параметри роботи тканинного фільтра відповідно до варіанту завдання, наведеного в табл. 25.

### ***Питання для самоконтролю***

1. Опишіть будову тканинного рукавного фільтра та принцип його роботи.
2. Які переваги й недоліки виявлено в процесі експлуатації тканинних фільтрів для вловлювання пилу з газопилових сумішей?
3. Які напрями використання тканинних фільтрів?
4. Дайте порівняльну характеристику використання тканинних фільтрів та апаратів мокрого очищення газів.

Таблиця 25 – Вихідні дані для розрахунку параметрів тканинного фільтра

№ вар.	Вміст пилу $L$ , г/м <sup>3</sup>	Витрата газу $Q$ , м <sup>3</sup> /хв	Період регенерації фільтра $t$ , хв	№ вар.	Вміст пилу $L$ , г/м <sup>3</sup>	Витрата газу $Q$ , м <sup>3</sup> /хв	Період регенерації фільтра $t$ , хв
1	1	80	45	11	10	90	110
2	2	85	50	12	9	100	120
3	3	90	55	13	8	110	130
4	4	95	60	14	7	120	140
5	5	100	65	15	6	130	150
6	6	110	70	16	5	140	160
7	7	120	80	17	4	150	170
8	8	130	90	18	3	160	180
9	9	140	100	19	2	170	190
10	10	150	110	20	1	180	200

*Примітка.* Номер варіанта кожен студент обирає за своїм порядковим номером у списку академічної групи.

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 8

### РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРІВ

**Мета роботи:** Ознайомитися з принципом роботи електрофільтрів та з методикою розрахунку їх технологічних параметрів.

**Методика розрахунку.** Робота електрофільтра передбачає рух запиленого газоповітряного потоку через канал прямокутного перерізу, утвореного двома паралельними пластинами, як це показано на рис 10.

Процес очищення речовин в електрофільтрах описується так званим *німецьким рівнянням*, для якого прийнято такі припущення:

- газ (і частинки в ньому) рухається в напрямку осі  $X$  зі швидкістю  $v$ ;
- частинки розподіляються в напрямках осей  $Y$  та  $Z$  у кожній точці уздовж осі  $X$ ;
- під дією електричного поля частинки пилу переміщуються із швидкістю  $w$  у напрямку осі  $Y$ .

При цьому концентрація твердих частинок вздовж осі  $X$  постійно зменшується, а матеріальний баланс процесу виражається в такий спосіб:

$$M = vH \frac{D}{2} C_x - vH \frac{D}{2} C_{x+\Delta x}, \quad (51)$$

де  $M$  – маса видалених частинок пилу;  $v$  – швидкість переміщення газу, м/хв;  $H$  – висота електрода, м;  $D$  – ширина каналу, м;  $C$  – концентрація твердих частинок у газовому потоці в певній точці вздовж осі  $X$ , г/м<sup>3</sup>.



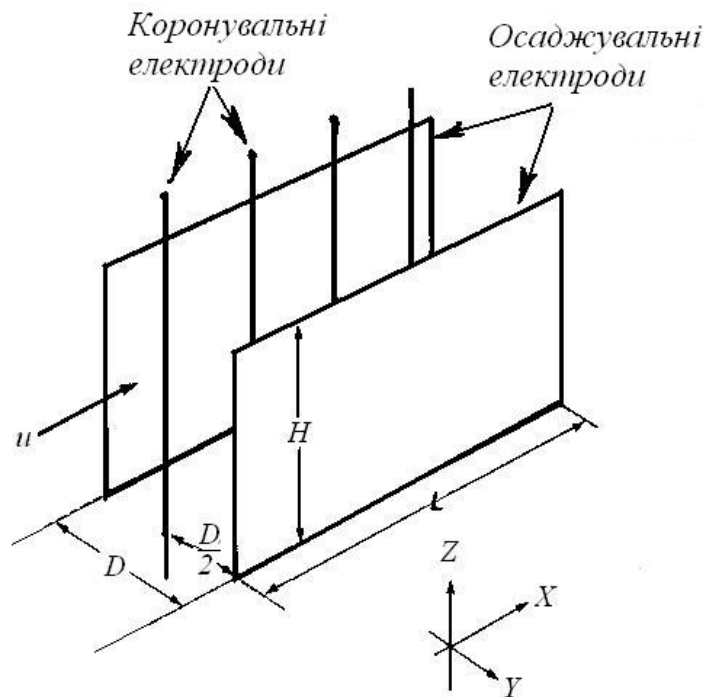


Рис. 10. Схема руху газопилової суміші в електрофільтрі

Рівняння може бути перетворено з огляду на зміну концентрації в процесі руху частинок по осі  $X$ , тобто

$$-\frac{vHD}{2} \cdot \frac{dC}{dx} = wHC, \quad (52)$$

де  $w$  – поперечна швидкість частинок у напрямку осі  $Y$ .

У цьому рівнянні можна задіяти довжину всієї камери  $L$  замість певної точки простору вздовж осі  $X$ , використавши початкову й кінцеву величини концентрації твердих частинок, а саме:

$$\ln\left(\frac{C_L}{C_0}\right) = \frac{-2wHL}{uHD} \quad (53)$$

або

$$\ln\left(\frac{C_L}{C_0}\right) = \frac{-wA_p}{Q_c}, \quad (54)$$

де  $A_p$  – площа одного електрода з обох боків каналу,  $m^2$ ;  $Q_c$  – витрата газоповітряної суміші,  $m^3/хв$ .

Тоді в застосуванні до всього електрофільтра

$$\frac{C_L}{C_0} = e^{(-wA/Q)} \quad (55)$$

Якщо прийняти, що відношення  $\frac{C_L}{C_0}$  означає вміст твердих частинок пилу у викиді ( $P_i = 1 - \eta$ ), то одержуємо німецьке рівняння такого вигляду:

$$\eta = 1 - e^{(-wA/Q)}, \quad (56)$$

де  $\eta$  – фракційна ефективність уловлювання пилу.

Площу одного електрода обчислюють за такою формулою:

$$A = A_p(n-1)N_s = A_p(N - N_s), \quad (57)$$

де  $A_p$  – площа одного електрода з обох боків ( $A_p = 2HL_p$ ), м<sup>2</sup>;  $n$  – кількість осаджувальних електродів у секції;  $N$  – загальна кількість осаджувальних електродів в електрофільтрі;  $N_s$  – кількість секцій.

### **Приклад розв'язування типових задач**

*Задача 1.* Обчислити загальну площу осадження частинок в електрофільтрі, ефективність якого  $\eta = 98\%$ , а також визначити кількість осаджувальних електродів, якщо витрата газоповітряної суміші  $Q = 10000$  м<sup>3</sup>/хв. Ефективна поперечна швидкість руху частинок у напрямку осі  $Y$   $w = 6,0$  м/хв. Беруть до уваги такі розміри осаджувальних електродів: довжина – 3 м, висота – 6 м, передбачивши у фільтрі дві секції.

#### *Розв'язування*

1. Обчислюємо загальну площу осадження частинок в електрофільтрі таким чином:

$$\ln\left(\frac{C_L}{C_0}\right) = \ln(1 - \eta) = \frac{-wA_p}{Q_c};$$

$$A = -\frac{Q}{w} \ln(1 - \eta) = -\frac{10000 \text{ м}^3 / \text{хв}}{6,0 \text{ м} / \text{хв}} \ln(0,02) = 6520 \text{ м}^2.$$

2. Визначаємо кількість осаджувальних електродів, а саме:

$$A = A_p(N - N_s) = A_p(N - 2);$$

$$N = \frac{A}{A_p} + 2 = \frac{6520 \text{ м}^2}{2 \cdot 3 \cdot 6} + 2 = 183,1 = 184.$$

Таким чином, кожна секція електрофільтра має 92 електроди.

*Задача 2.* Розрахувати кінцеву концентрацію пилу в технологічних газах та ефективність пилоочищення в електрофільтрі за таких умов: витрата газоповітряної суміші  $Q = 10000$  м<sup>3</sup>/хв; початкова запиленість газу  $C_0 = 3$  г/м<sup>3</sup>. Розміри електрода: довжина – 4 м, висота – 6 м. Електрофільтр має 3 секції, у складі кожної секції 80 електродів. Ефективна поперечна швидкість частинок, що рухаються у напрямку осі  $Y$ ,  $w = 6,0$  м/хв.

#### *Розв'язування*

1. Обчислюємо загальну площу осадження частинок в електрофільтрі, а саме:

$$A_p = 2 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 80 \cdot 3 = 11520 \text{ м}^2.$$

2. Розраховуємо кінцеву концентрацію пилу, тобто

$$\frac{C_L}{C_0} = e^{(-wA/Q)} ;$$

$$C_L = C_0 \cdot e^{(-wA/Q)} = 3 \cdot 2,718^{-\frac{6 \cdot 11520}{10000}} = 0,003.$$

3. Визначаємо ефективність пилоочищення в електрофільтрі таким чином:

$$\eta = \frac{C_0 - C_L}{C_0} = \frac{3 - 0,003}{3} = 0,999, \text{ тобто } 99,9 \%$$

### **Контрольне завдання**

1. Розрахувати ефективність пилоочищення викидів в електрофільтрі відповідно до варіанта завдання, наведеного в табл. 26.

Таблиця 26 – Вихідні дані для розрахунку ефективності електрофільтра

№ вар.	Витрата газу $Q$ , тис. м <sup>3</sup> /хв	Поперечна швидкість частинок $w$ , м/хв	Початкова запиленість газу $C_0$ , г/м <sup>3</sup>	№ вар.	Витрата газу $Q$ , тис. м <sup>3</sup> /хв	Поперечна швидкість частинок $w$ , м/хв	Початкова запиленість газу $C_0$ , г/м <sup>3</sup>
1	7	5,5	2,0	11	12	5,5	8,0
2	7,5	6,0	3,0	12	12,5	6,0	9,2
3	8	6,5	4,0	13	13	6,5	10,5
4	8,5	7,0	5,0	14	13,5	7,0	11,0
5	9	7,5	6,5	15	14	7,5	12,5
6	9,5	8,0	7,7	16	14,5	8,0	13,7
7	10	8,5	8,8	17	15	8,5	14,8
8	10,5	9,0	9,0	18	15,5	9,0	15,0
9	11	9,5	10,3	19	16	9,5	16,3
10	11,5	10,0	11,5	20	16,5	10,0	17,5

*Примітка.* Номер варіанта кожен студент обирає за своїм порядковим номером у списку академічної групи.

### **Питання для самоконтролю**

1. Опишіть будову електрофільтра та принцип його роботи.
2. Які фактори впливають на процес електростатичного очищення викидів в електрофільтрах?
3. У яких галузях промисловості доцільно використовувати електрофільтри?

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 9

### РОЗРАХУНОК ХІМІЧНОГО БАЛАНСУ АБСОРБЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗОПОДІБНИХ СУМІШЕЙ

**Мета роботи:** ознайомитися з методикою розрахунку хімічного балансу абсорбційного очищення викидів.

**Методика розрахунку.** Абсорбція – фізико-хімічний процес поглинання речовин із розчинів чи сумішей газів твердими тілами або рідинами. При абсорбції поглинання речовини відбувається всім об'ємом поглинача. Абсорбція набула широкого застосування в техніці, головним чином для розділення газоподібних сумішей на складові частини шляхом розчинення одного чи декількох компонентів у рідині, яка називається абсорбентом [1, 8].

Розрахунок хімічного балансу абсорбційного очищення базується на аналізі стехіометричних рівнянь, що дозволяє обчислити необхідну масу абсорбенту для зв'язування відповідної речовини в газі.

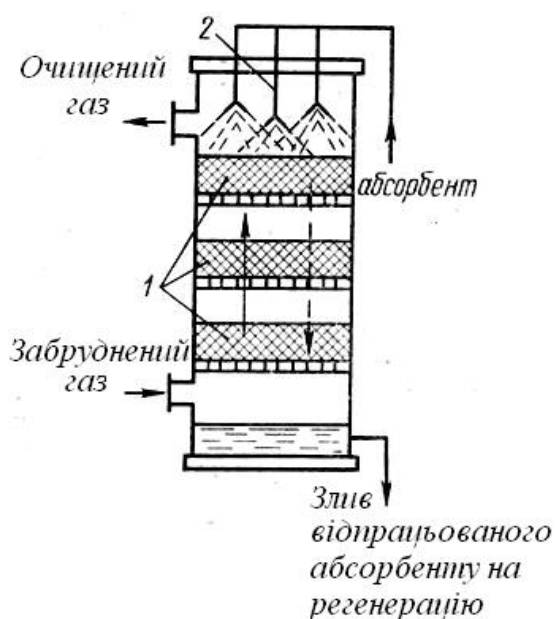


Рис. 11. Принципова схема очищення викидів в абсорбційній колоні:

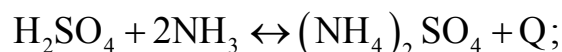
1 – подача абсорбенту; 2 – насадка

#### Приклад розв'язування типової задачі

**Задача.** Унаслідок технологічного процесу відбувається викид газоповітряної суміші з парами 1%-ної сірчаної кислоти ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Її очищення здійснюють в абсорберах за допомогою аміаку ( $\text{NH}_3$ ). Розрахувати технологічний баланс процесу очищення коли витрата суміші  $Q = 1000 \text{ м}^3$ , а ефективність адсорбції  $\eta = 90 \%$ . Для нейтралізації суміші використовується 5%-ний розчин аміаку.

#### Розв'язування

1. Знайдемо масу сірчаної кислоти, яка міститься в  $1000 \text{ м}^3$  газу, беручи до уваги, що концентрація забруднювача становить 1 %, таким чином:



$$V(\text{газу}) = 1000 \text{ м}^3; \text{C}(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1\%; V(\text{H}_2\text{SO}_4) = 10 \text{ м}^3;$$

$$m(\text{H}_2\text{SO}_4) - M(\text{H}_2\text{SO}_4) \quad 98 \text{ г/моль}$$

$$10 \text{ м}^3 \quad V(\text{H}_2\text{SO}_4) - 22,4 \text{ л/моль}$$

$$m(\text{H}_2\text{SO}_4) = [V(\text{H}_2\text{SO}_4) \times M(\text{H}_2\text{SO}_4)] / 22,4 = [10 \times 98] / 22,4 = 43,75 \times 10^3 (\text{г}) \\ = 43,75 (\text{кг}).$$

Цей розрахунок відповідає 100%-ному ступеню звільнення повітря від аміаку, що на практиці дуже важко досягти використовуючи один контур очищення. В умовах завдання передбачено 90%-ний ступінь очищення, тому фактична маса кислоти, що вступила в реакцію,

$$m_{(\text{факт})}(\text{H}_2\text{SO}_4) = 43,75 \times 0,9 = 39,375 \text{ кг.}$$

2. Знайдемо, яка маса аміаку необхідна для реакції, а саме:

$$17 \text{ г/моль} \quad M(\text{NH}_3) - M(\text{H}_2\text{SO}_4) \quad 98 \text{ г/моль}$$

$$m(\text{NH}_3) - m(\text{H}_2\text{SO}_4) \quad 39,375 \text{ кг}$$

$$m(\text{NH}_3) = m(\text{H}_2\text{SO}_4) \times M(\text{NH}_3) / M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 39,375 \times 17 / 98 = 6,83 \text{ кг.}$$

Як і в попередньому випадку, розрахунок стосується 100%-ної концентрації аміаку, на практиці ж використовують робочі розчини з розведенням 2–10 %.

Так, для реакції необхідно:

$$5 \text{ г NH}_3 - 100 \text{ г 5\%-ного розчину}$$

$$6,83 \text{ кг NH}_3 - x \text{ кг розчину}$$

$$x = 6,83 \times 100 / 5 = 136,6 \text{ кг 5\%-ного розчину NH}_3.$$

3. Визначимо масу солі  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , яка утворюється внаслідок реакції нейтралізації. При цьому розрахунок продукту ведемо, беручи до уваги речовину, якої бракує, а саме:

$$98 \text{ г/моль} \quad M(\text{H}_2\text{SO}_4) - M(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \quad 122 \text{ г/моль}$$

$$39,375 \text{ кг} \quad m(\text{H}_2\text{SO}_4) - m(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$$

$$m(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 = 39,375 \times 122 / 98 = 49,018 \text{ кг.}$$

Отже, для очищення  $1000 \text{ м}^3$  газу, який містить 1 % сірчаної кислоти, необхідно  $136,6 \text{ кг 5\%-ного розчину аміаку}$ .

Після очищення отримують  $49,018 \text{ кг солі } (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ .

Для реального технологічного процесу, як правило, використовують надлишкову кількість робочого розчину, приблизно на 10 % більше розрахункових значень.

### Контрольне завдання

1. Розрахувати хімічний баланс очищення газопилової суміші в адсорбері відповідно до варіанта завдання, наведеного в табл. 27. Решту параметрів для розрахунку обрати потрібно взяти з вихідних даних типової задачі.

Таблиця 27 – Вихідні дані для розрахунку абсорбційного очищення газової суміші

№ вар.	Витрата газової суміші $Q$ , тис. м <sup>3</sup> /год	Вміст H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> у газі, % (об.)	Ефективність очищення $\eta$ , %	№ вар.	Витрата газової суміші $Q$ , тис. м <sup>3</sup> /год	Вміст H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> у газі, % (об.)	Ефективність очищення $\eta$ , %
1	5,0	0,5	85	11	10,0	0,5	75
2	5,5	0,7	87	12	10,5	0,7	77
3	6,0	0,9	89	13	11,0	0,9	79
4	6,5	1,0	90	14	11,5	1,0	80
5	7,0	1,2	91	15	12,0	1,2	81
6	7,5	1,4	92	16	12,5	1,4	82
7	8,0	1,6	93	17	13,0	1,6	83
8	8,5	1,8	94	18	13,5	1,8	84
9	9,0	2,0	95	19	14,0	2,0	85
10	9,5	2,5	96	20	14,5	2,5	86

*Примітка.* Номер варіанта кожен студент обирає за своїм порядковим номером у списку академічної групи.

### Питання для самоконтролю

1. Опишіть будову абсорбера та принцип його роботи.
2. Яким чином розраховують хімічний баланс абсорбційного очищення викидів?
3. Які фактори впливають на процес абсорбції?
4. У яких галузях промисловості доцільно використовувати абсорбери?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Природоохоронні технології. Ч 1. Захист атмосфери / В.Г. Петрук, Л.І. Северин, І.В. Васильківський, І.І. Безвозюк. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2010. – 318 с.
2. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков и др.; под общ. ред. А. А. Русанова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 312 с., ил.
3. Бережной С.А. Сборник типовых расчетов и заданий по экологии: учеб. пособие / С.А. Бережной, Ю.С. Седов. – Тверь : ТГТУ, 1999. – 398 с.
4. Cooper C. D. Air Pollution Control: A Design Approach. / C. D. Cooper, F. C. Alley. – Illinois: Waveland Press, Inc., Prospect Heights, 2002. – 738 p.
5. Алиев Г.М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. / Г.М. Алиев. – М. : Metallurgia, 1986. – 544 с.
6. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха / А.И. Пирумов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Стройиздат, 1981. – 218 с.
7. Основные схемы и оборудование для очистки от пыли отходящих газов на предприятиях угольной промышленности: техн. описание / В. Г. Путилов. – Пермь : ВНИИОСуголь, 1974. – 256 с.
8. Родионов А.И. Техника защиты окружающей среды / А.И. Родионов, В.Н. Клушин, Н.С. Торочешников – М. : Химия, 1989. – 154 с.

## Значення нормальної функції розподілу частинок пилу у викидах

$X$	$\Phi(X)$	$X$	$\Phi(X)$	$X$	$\Phi(X)$	$X$	$\Phi(X)$	$X$	$\Phi(X)$	$X$	$\Phi(X)$
-2,70	0,0035	-1,28	0,1003	-0,44	0,3300	0,40	0,6554	1,24	0,8925	2,40	0,9918
-2,60	0,0047	-1,26	0,1038	-0,42	0,3372	0,42	0,6628	1,26	0,8962	2,50	0,9938
-2,50	0,0062	-1,24	0,1075	-0,40	0,3446	0,44	0,6700	1,28	0,8997	2,60	0,9953
-2,40	0,0082	-1,22	0,1112	-0,38	0,3520	0,46	0,6772	1,30	0,9032	2,70	0,9965
-2,30	0,0107	-1,20	0,1152	-0,36	0,3594	0,48	0,6844	1,32	0,9066		
-2,20	0,0139	-1,18	0,1190	-0,34	0,3669	0,50	0,6915	1,34	0,9099		
-2,10	0,0179	-1,16	0,1230	-0,32	0,3745	0,52	0,6985	1,36	0,9131		
-2,00	0,0228	-1,14	0,1271	-0,30	0,3821	0,54	0,7054	1,38	0,9162		
-1,98	0,0239	-1,12	0,1314	-0,28	0,3897	0,56	0,7123	1,40	0,9192		
-1,96	0,0250	-1,10	0,1357	-0,26	0,3974	0,58	0,7190	1,42	0,9222		
-1,94	0,0262	-1,08	0,1401	-0,24	0,4052	0,60	0,7257	1,44	0,9251		
-1,92	0,0274	-1,06	0,1446	-0,22	0,4129	0,62	0,7324	1,46	0,9279		
-1,90	0,0288	-1,04	0,1492	-0,20	0,4207	0,64	0,7389	1,48	0,9306		
-1,88	0,0301	-1,02	0,1539	-0,18	0,4286	0,66	0,7454	1,50	0,9332		
-1,86	0,0314	-1,00	0,1587	-0,16	0,4364	0,68	0,7517	1,52	0,9357		
-1,84	0,0329	-0,98	0,1635	-0,14	0,4443	0,70	0,7580	1,54	0,9382		
-1,82	0,0344	-0,96	0,1685	-0,12	0,4522	0,72	0,7642	1,56	0,9406		
-1,80	0,0359	-0,94	0,1736	-0,10	0,4602	0,74	0,7703	1,58	0,9429		
-1,78	0,0375	-0,92	0,1788	-0,08	0,4681	0,76	0,7764	1,60	0,9452		
-1,76	0,0392	-0,90	0,1841	-0,06	0,4761	0,78	0,7823	1,62	0,9474		
-1,74	0,0409	-0,88	0,1894	-0,04	0,4840	0,80	0,7881	1,64	0,9495		
-1,72	0,0427	-0,86	0,1949	-0,02	0,4920	0,82	0,7937	1,66	0,9515		
-1,70	0,0446	-0,84	0,2005	0,00	0,5000	0,84	0,7995	1,68	0,9535		
-1,68	0,0465	-0,82	0,2061	0,02	0,5080	0,86	0,8051	1,70	0,9554		
-1,66	0,0485	-0,80	0,2119	0,04	0,5160	0,88	0,8106	1,72	0,9573		
-1,64	0,0505	-0,78	0,2177	0,06	0,5239	0,90	0,8159	1,74	0,9591		
-1,62	0,0526	-0,76	0,2236	0,08	0,5310	0,92	0,8212	1,76	0,9608		
-1,60	0,0548	-0,74	0,2297	0,10	0,5398	0,94	0,8264	1,78	0,9625		
-1,58	0,0571	-0,72	0,2358	0,12	0,5478	0,96	0,8315	1,80	0,9641		
-1,56	0,0594	-0,70	0,2420	0,14	0,5557	0,98	0,8365	1,82	0,9656		
-1,54	0,0616	-0,68	0,2483	0,16	0,5636	1,00	0,8413	1,84	0,9671		
-1,52	0,0643	-0,66	0,2546	0,18	0,5714	1,02	0,8461	1,86	0,9686		
-1,50	0,0668	-0,64	0,2611	0,20	0,5793	1,04	0,8508	1,88	0,9699		
-1,48	0,0694	-0,62	0,2676	0,22	0,5871	1,06	0,8554	1,90	0,9713		
-1,46	0,0721	-0,60	0,2743	0,24	0,5948	1,08	0,8599	1,92	0,9726		
-1,44	0,0749	-0,58	0,2810	0,26	0,6026	1,10	0,8643	1,94	0,9738		
-1,42	0,0778	-0,56	0,2877	0,28	0,6103	1,12	0,8686	1,96	0,9750		
-1,40	0,0808	-0,54	0,2946	0,30	0,6179	1,14	0,8729	1,98	0,9761		
-1,38	0,0838	-0,52	0,3015	0,32	0,6255	1,16	0,8770	2,00	0,9772		
-1,36	0,0869	-0,50	0,3085	0,34	0,6331	1,18	0,8810	2,10	0,9821		
-1,34	0,0901	-0,48	0,3156	0,36	0,6406	1,20	0,8849	2,20	0,9861		
-1,32	0,0934	-0,46	0,3228	0,38	0,6480	1,22	0,8888	2,30	0,9893		



## ЗМІСТ

<b>ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ</b> .....	3
<b>Практична робота № 1.</b> Розрахунок параметрів пилоосаджувальних камер	4
<b>Практична робота № 2.</b> Розрахунок технологічних параметрів роботи циклона.....	7
<b>Практична робота № 3.</b> Розрахунок фракційної ефективності відцентрового циклона за методикою Лапле.....	15
<b>Практична робота № 4.</b> Розрахунок технологічних характеристик батарейних циклонів.....	22
<b>Практична робота № 5.</b> Розрахунок ефективності вертикальних аерозольних скрубєрів.....	28
<b>Практична робота № 6.</b> Розрахунок ефективності скрубєрів Вентурі.....	33
<b>Практична робота № 7.</b> Розрахунок параметрів роботи тканинних фільтрів.....	36
<b>Практична робота № 8.</b> Розрахунок технологічних параметрів електрофільтрів.....	40
<b>Практична робота № 9.</b> Розрахунок хімічного балансу абсорбційної очистки.....	44
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	47
<b>ДОДАТКИ</b> .....	48

**Ковров** Олександр Станіславович  
**Бучавий** Юрій Володимирович

ОЧИСТКА ГАЗОПИЛОВИХ ВИКИДІВ.  
МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ  
ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ З ДИСЦИПЛІНИ  
СТУДЕНТАМИ НАПРЯМУ ПІДГОТОВКИ  
6.040106 ЕКОЛОГІЯ, ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО  
СЕРЕДОВИЩА ТА ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Редактор О.Н. Ільченко

Підписано до друку 31.01.2013. Формат 30x42/4.  
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 2,9.  
Обл.-вид. арк. 3,6. Тираж 100 пр. Зам №

ДВНЗ «Національний гірничий університет»  
49005, Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.