

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ
УКРАЇНИ**

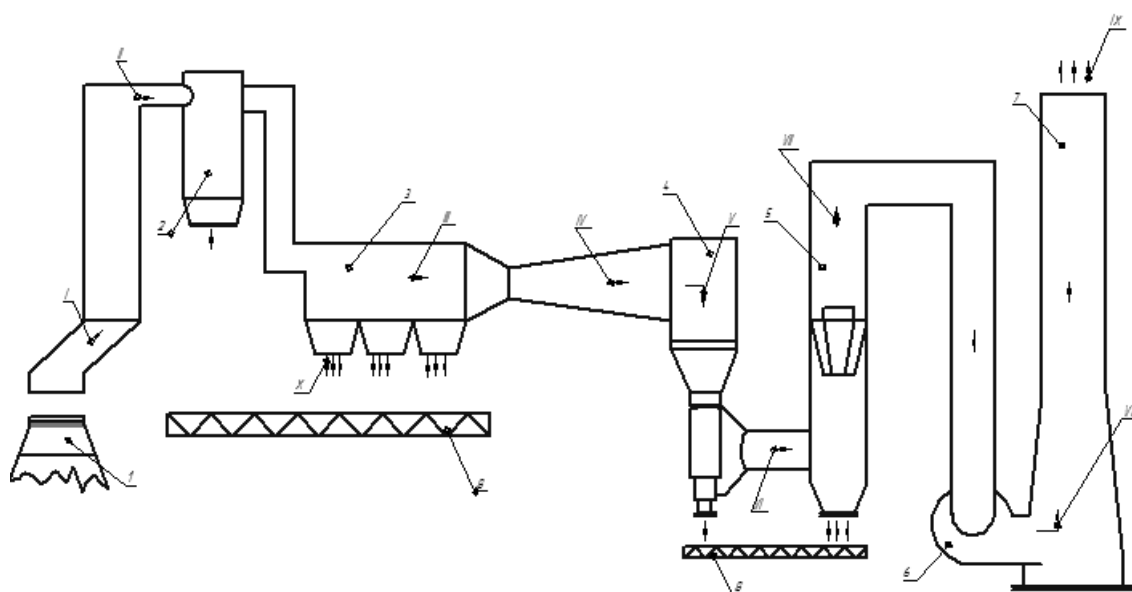
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВИХ ПРОЕКТІВ

З КУРСУ

„ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ”



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ
УКРАЇНИ**

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра екології та технології рослинних полімерів

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВИХ ПРОЕКТІВ

З КУРСУ

„ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ”

**для студентів спеціальності 6.040106 „Екологія, охорона
навколишнього середовища та збалансоване природокористування”**

*Рекомендовано Вченою радою
інженерно-хімічного факультету НТУУ „КПІ”
протокол № 3 від 27.02.12 р.*

2012

Методичні вказівки до виконання курсових проектів з курсу „Технологія та обладнання захисту атмосфери” для студентів спеціальності 6.040106 „Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування” / Укл. О.І.Іваненко. – К.: ТОВ „Інфодрук”, 2012. – 107 с. – Укр.мовою.

Укладач: канд. техн. наук, доцент

Іваненко Олена Іванівна

Рецензент

Д.Е. Сідоров, канд. техн. наук, доц.,

Національний технічний університет України „КПІ”

Відповідальний редактор

М.Д. Гомеля, доктор техн. наук, проф.,

Національний технічний університет України „КПІ”

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ
УКРАЇНИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Іваненко Олена Іванівна

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВИХ ПРОЕКТІВ

З КУРСУ

„ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ”

**для студентів спеціальності 6.040106 „Екологія, охорона
навколишнього середовища та збалансоване природокористування”**

*Рекомендовано Вченою радою
інженерно-хімічного факультету НТУУ „КПІ”
протокол № 3 від 27.02.12 р.*

Віддруковано ТОВ „Інфодрук”

03113, м.Київ, вул. М.Шпака, 2, тел. 456-68-83

Підписано до друку 1.03.2012 р.

Тираж 100 прим.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ.....	6
2. СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА КУРСОВОГО ПРОЕКТУ.....	6
2.1. Зміст пояснювальної записки	7
3. ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ	Ошибка! Закладка не определена.
3.1. Анотація.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.2. Вступ.	8
3.3. Літературний огляд	8
3.4. Оцінка токсичності забруднення.....	8
3.5. Методи аналізу та контролю забруднень в навколишньому середовищі та на виробничому об'єкті.....	8
3.6. Теоретичні дані про процеси, що реалізуються в обраній технології...	8
3.7. Розрахунок та вибір очисних споруд	9
3.8. Утилізація вловлених забруднень	9
3.9. Висновки.....	9
3.10. Перелік посилань.....	9
3.11. Додатки	9
4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКУ ТА ВИБОРУ ОЧИСНИХ СПОРУД.....	12
4.1. Розрахунок матеріального балансу.....	Ошибка! Закладка не определена.
Розглянемо на прикладі:	Ошибка! Закладка не определена.
4.2. Визначення розмірів пилоосаджувальної камери	16
Розглянемо на прикладі:	19
4.3. Розрахунок пилоосаджувальної камери.....	221
Розглянемо на прикладі:	25
4.4. Розрахунок та вибір циклона.....	27
Розглянемо на прикладі:	39
4.5. Розрахунок електрофільтру.....	43
Розглянемо на прикладі:	54

4.6. Розрахунок відцентрового скрубера	Ошибка! Закладка не определена.
Розглянемо на прикладі 1:	Ошибка! Закладка не определена.
Розглянемо на прикладі 2:	Ошибка! Закладка не определена.
4.7. Розрахунок скрубера Вентурі.....	67
Розглянемо на прикладі 1:	78
Розглянемо на прикладі 2:	81
4.8. Розрахунок рукавного фільтру.....	85
Розглянемо на прикладі:	102
5. ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ.....	104
6. ВКАЗІВКИ ПРО ПОРЯДОК ЗАХИСТУ ПРОЕКТУ.....	105
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	106

ВСТУП

На сьогодні антропогенне навантаження на навколишнє середовище значно перевищує можливість до самоочищення. Майбутнє людства залежить від його здатності радикально зменшити обсяги викидів забруднень у довкілля, від вміння раціонально використовувати природні ресурси. Одним із технічних напрямків вирішення цієї проблеми є розробка оптимальних ощадливих технологій та ефективне застосування обладнання захисту атмосфери.

Очищення газів в промисловості є складним та актуальним питанням, що потребує швидкого вирішення та має певний ряд аспектів. Технологічні аспекти заключаються в переході до нових способів та систем газоочищення, що ґрунтуються на останніх досягненнях науки і техніки, модернізації малоефективного обладнання розділення газів, створенні високоефективної апаратури та схем видалення газоподібних та пилових забруднень. Економічні аспекти заключаються в розробці таких способів і систем, що дозволяють значно збільшити ефективність вилучення цінних компонентів з сировини, максимально утилізувати вловлені при очищенні продукти, підвищити економічність роботи обладнання. Екологічні аспекти заключаються в зниженні до санітарних норм питомих викидів забруднюючих шкідливих речовин в атмосферу, ліквідації залпових викидів шкідливих речовин, що пов'язані з обслуговуванням та аваріями обладнання, створенні безвідходних технологій.

Вирішити це складне питання можливо на основі глибокого та всебічного аналізу способів і апаратів очищення газів та втілення отриманих знань в прийнятті технічно та екологічно грамотних рішень.

1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Мета курсового проекту – систематизація, закріплення та розширення теоретичних і практичних знань, здобутих при вивченні основних дисциплін спеціальності, розвиток у студента навичок вести інженерні обчислення, уміння користуватися довідковою та технічною літературою, здатності самостійно приймати інженерні рішення при вирішенні конкретних наукових, технічних, економічних проблем. Курсовий проект дозволяє виявити підготовленість студентів для роботи в сучасних умовах прогресивного розвитку науки, техніки, культури, при зростаючих вимогах до якості очищення повітря, забезпечення раціонального використання природних ресурсів та утилізації вловлених компонентів з отриманням товарного продукту або як мінімум їх знешкодження.

Курсовий проект виконується відповідно до виданого студенту завдання, в якому вказана тема проекту, дані щодо витрати газу, концентрації забруднюючих домішок, температури газу, розміру пилових часток і тому подібне. Всі інші дані, необхідні для обчислень, студент бере з додаткової літератури (див. список рекомендованої літератури).

2. СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Курсовий проект повинен містити: папку, пояснювальну записку, диск з курсовим проектом, графічну частину. Обсяг пояснювальної записки повинен складатися з 50-60-х сторінок, графічна частина - з 3-х листів креслень.

2.1. Зміст пояснювальної записки

Зміст пояснювальної записки має відображати, як студент вивчив літературу з даного питання, обґрунтував прийняті рішення, виконав необхідні розрахунки, привів ілюстративні матеріали (малюнки, схеми, таблиці і т.д.). Оформлення записки виконується 14 кеглем шрифтом «Times New Roman» з полуторним інтервалом, вона віддруковується на одному боці аркушу формату А4, використовуючи рамки відповідного зразку для курсового проекту, з полями таких розмірів: верхнє, нижнє та зовнішнє поле - 15 мм, внутрішнє - 25 мм.

У процесі компонування альбому проекту листки розміщують у такій послідовності: титульний лист; завдання на проектування; анотація; пояснювальна записка.

У пояснювальній записці курсового проекту повинні бути наступні розділи: Вступ; 1.Літературний огляд; 2.Оцінка токсичності забруднень; 3.Методи аналізу і контролю забруднень в навколишньому середовищі та на виробничому об'єкті; 4.Теоретичні дані про процеси, що реалізуються в обраній технології; 5.Розрахунок та вибір очисних споруд; 6.Утилізація вловлених забруднень; Висновки; Перелік посилань; Додатки.

3. ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

3.1. Анотація

Анотація – це короткий виклад змісту курсового проекту. Метою анотації являється ознайомлення читача із завданням проекту. Анотація повинна бути написана двома мовами: мовою тексту та однією з іноземних. В анотації повинно бути вказано: тему проекту; його загальний обсяг (кількість листків, таблиць, додатків, ілюстрацій, креслень); об'єкт та мету проекту; результати та область їх застосування.

3.2. Вступ

Його виклад оснований на літературних даних, відомостях, отриманих на лекціях зі спеціальності. У вступі характеризуються поставлені задачі щодо очищення атмосфери, значення правильно обраної технологічної схеми очисних споруд, що проектується. Також описуються шкідливі речовини, що утворюються на заданому виробництві, заходи для зменшення навантаження на атмосферу, вплив забруднень виробництва на стан атмосфери. І на останнє висвітлюється мета курсового проекту.

3.3. Літературний огляд

У літературному огляді потрібно вказати загальні відомості по темі курсового проекту, висвітлити технологію виробництва, зокрема етапи, на яких відбувається забруднення атмосфери.

3.4. Оцінка токсичності забруднень

У цьому розділі розглядається питання про токсичність забруднень у вихідних газах, що утворюються на даному виробництві. Потрібно вказати, які речовини (розчинені гази, пил, рідини) виділяються на певному етапі виробництва, їх загальний характер дії на організм людини і ГДК.

3.5. Методи аналізу та контролю забруднень в навколишньому середовищі та на виробничому об'єкті

Потрібно вказати методи визначення в повітрі шкідливих речовин, які виділяються в процесі виробництва, дати їх характеристику.

3.6. Теоретичні дані про процеси, що реалізуються в обраній технології

У даному розділі викладаються теоретичні відомості про очисні споруди і методи очищення, що використовуються в обраній технології. Крім того, обґрунтовується вибір очисних споруд і методів очищення з урахуванням переваг і недоліків.

3.7. Розрахунок та вибір очисних споруд

У цьому розділі виконуються всі розрахунки та описання запропонованих очисних споруд (циклонів, скрубєрів, електрофільтрів, тканинних фільтрів і т.п.). Також розраховується матеріальний баланс так, щоб концентрація забруднюючих речовин на виході була меншою або дорівнювала $GDK_{p.з.}$.

3.8. Утилізація вловлених забруднєнь

Розглядаються питання по утилізації вловленого пилу та відпрацьованих абсорбційних розчинів. Вказується, які існують технології по утилізації або знешкодженню, їх характеристики, переваги та недоліки застосування.

3.9. Висновки

Приводяться короткі висновки про виконану роботу, рекомендації щодо впровадження отриманих результатів.

3.10. Перелік посилань

Приводиться повний список літератури, що використаний в курсовому проекті.

3.11. Додатки

Додатки – це допоміжні матеріали, необхідні для повноти сприйняття креслень, що входять до курсового проекту. Тобто опис всіх елементів та потоків руху газу, уловленого пилу, абсорбційного розчину, що входять до технологічної схеми та креслень апаратів, з урахуванням їх кількості.

Приклади додатків:

Додаток А

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кількість	Примітка
				<u>Документація</u>		
A1				<u>Технологічна схема</u>		
		1		Джерело викиду	1	
		2		Циклон	4	
		3		Електрофільтр	1	
		4		Труба Вентурі	1	
		5		Краплевловлювач	1	
		6		Димосос	1	
		7		Шламовідвід	1	
		8		Димова труба	1	
		9		Бункер	2	
		10		Транспортерна стрічка	1	
				<u>Потоки</u>		
		I		Подача газу на очищення		
		II		Первинне очищення газу		
				в циклоні		
		III		Доочищення газу в		
				електрофільтрі		
		IV		Потік газу в трубу Вентурі		
		V		Потік газу в трубі Вентурі		
		VI		Подача газу в		
				краплевловлювач		
		VII		Потік газу до димососу		
		VIII		Подача газу димососом		
		IX		Вихід очищеного газу		
		X		Відвал шламу		
Зм.	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата	ЛЕ-9105 Технологічна схема	
Розроб.	Карпенко					
Перев.	Іваненко					
Н. Конт.						
Затв.	Іваненко					
					Літ.	Аркуш
						Аркушів
					НТУУ "КПІ" ІХФ ЛЕ-91	

Додаток В

[illegible]

4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКУ ТА ВИБОРУ ОЧИСНИХ СПОРУД

4.1. Розрахунок матеріального балансу

Розраховуємо об'ємну витрату газу за рік:

$$V_p = V_r \cdot 365 \cdot 24 \text{ [м}^3\text{/рік]}, \quad (4.1)$$

де V_r - об'ємна витрата газу за годину.

Розраховуємо масу вхідного пилу:

$$m_1 = C_{\text{вх пилу}} \cdot V_p \text{ [т/рік]}. \quad (4.2)$$

Розраховуємо кількість пилу, що видалилася у першому апараті пилоочищення:

$$m_2 = m_1 \cdot \eta_1 \text{ [т/рік]}, \quad (4.3)$$

де η_1 - ефективність очищення від пилу у першому апараті очищення, %.

Кількість пилу, що подається на другий апарат пилоочищення:

$$m_3 = m_1 - m_2 \text{ [т/рік]}. \quad (4.4)$$

Визначимо концентрацію пилу вихідних газів після першого апарату:

$$C_1 = m_3 / V_p \text{ [т/м}^3\text{]}. \quad (4.5)$$

Якщо концентрація пилу не відповідає гранично допустимій концентрації, розраховуємо масу вловленого пилу у другому апараті:

$$m_4 = m_3 \cdot \eta_2 \text{ [т/рік]}, \quad (4.6)$$

де η_2 - ефективність очищення від пилу у другому апараті пилоочищення, %.

Маса пилу після другого апарату в очищеній газопиловій суміші:

$$m_5 = m_3 - m_4 \text{ [т/рік]}. \quad (4.7)$$

Визначимо концентрацію пилу після другого апарату:

$$C_{II} = m_5 / V_p \text{ [т/м}^3\text{]}, \text{ [мг/м}^3\text{]}. \quad (4.8)$$

Якщо залишкова концентрація пилу менша або дорівнює гранично допустимій концентрації, тоді розраховуємо масу розчиненого газу, що подається на перший абсорбційний апарат:

$$m_6 = C_r \cdot V_p \text{ [кг/рік]}. \quad (4.9)$$

Маса абсорбованого газу в першому апараті:

$$m_7 = m_6 \cdot \eta_3 \text{ [кг/рік]}. \quad (4.10)$$

Кількість розчиненого газу, що виділяється з першого апарату:

$$m_8 = m_6 - m_7 \text{ [кг/рік]}. \quad (4.11)$$

Концентрація розчиненого газу після першого апарату:

$$C_{III} = m_8 / V_p \text{ [кг/м}^3\text{]}, \text{ [мг/м}^3\text{]}. \quad (4.12)$$

Якщо концентрація розчиненого газу після першого абсорбційного апарату перевищує гранично допустиму концентрацію, далі розрахунки продовжуємо для другого апарату. Після розрахунків складаємо блок-схему матеріального балансу (рис.1).

Розглянемо на прикладі:

Вхідні параметри:

об'ємна витрата газу $V_r = 44000 \text{ м}^3/\text{год}$;

запиленість газового потоку $C_{\text{вх пилу}} = 570 \text{ г/м}^3$;

концентрація SO_2 в газах $C_{\text{SO}_2} = 0,01 \text{ кг/м}^3 = 10 \text{ г/м}^3$;

$$\Gamma_{\text{ДК}_{\text{р.з. пилу}}} = 1 \text{ мг/м}^3;$$

$$\Gamma_{\text{ДК}_{\text{р.з. SO}_2}} = 0,5 \text{ мг/м}^3.$$

$$\text{ефективність очищення від пилу у циклоні } \eta_1 = 88,3 \% = 0,883;$$

$$\text{ефективність очищення від пилу на електрофільтрі } \eta_2 = 99,999\% = 0,99999;$$

$$\text{ефективність видалення SO}_2 \text{ в першому скрубєрі } \eta_3 = 99 \% = 0,99;$$

$$\text{ефективність видалення SO}_2 \text{ в другому скрубєрі } \eta_4 = 99,9 \% = 0,999.$$

Розраховуємо об'ємну витрату газу за рік:

$$V_p = 44000 \cdot 365 \cdot 24 = 385440 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{рік}.$$

Розраховуємо масу вхідного пилу:

$$m_1 = 570 \cdot 385440 \cdot 10^3 = 219700800 \text{ кг/рік} = 219701 \text{ т/рік}.$$

Розраховуємо кількість пилу, що видалилася у циклоні:

$$m_2 = 219701 \cdot 0,883 = 193996 \text{ т/рік}.$$

Кількість пилу, що подається на електрофільтр:

$$m_3 = 219701 - 193996 = 25705 \text{ т/рік}.$$

Визначимо концентрацію пилу вихідних газів після циклону:

$$C_{\text{цикл}} = 25705 / 385440 \cdot 10^3 = 0,00006669 \text{ т/м}^3 = 66,7 \text{ г/м}^3.$$

Отже, концентрація пилу не відповідає гранично допустимій концентрації.

Розраховуємо масу вловленого пилу на електрофільтрі:

$$m_4 = 25705 \cdot 0,99999 = 25704,7 \text{ т/рік}.$$

Маса пилу після електрофільтру в очищеній газопиловій суміші:

$$m_5 = 25705 - 25704,7 = 0,3 \text{ т/рік}.$$

Визначимо концентрацію пилу після електрофільтру:

$$C_{\text{елект}} = 0,3 / 385440 \cdot 10^3 = 7,78 \cdot 10^{-10} \text{ т/м}^3 = 0,78 \text{ мг/м}^3.$$

Отже, концентрація пилу менша гранично допустимої концентрації.

Маса SO_2 , що подається на перший скрубєр:

$$m_6 = 0,01 \cdot 385440 \cdot 10^3 = 3854400 \text{ кг/рік.}$$

Маса видаленого SO_2 в першому скрубєрі:

$$m_7 = 3854400 \cdot 0,99 = 3815856 \text{ кг/рік.}$$

Кількість SO_2 , що виділяється з першого скрубєру:

$$m_8 = 3854400 - 3815856 = 38544 \text{ кг/рік.}$$

Концентрація SO_2 після першого скрубєру:

$$C_{\text{скруб I}} = 38544 / 385440 \cdot 10^3 = 0,0001 \text{ кг/м}^3 = 0,1 \text{ г/м}^3.$$

Концентрація SO_2 після першого скрубєру перевищує гранично допустиму концентрацію.

Маса видаленого SO_2 в другому скрубєрі:

$$m_9 = 38544 \cdot 0,999 = 38505,5 \text{ кг/рік.}$$

Кількість SO_2 , що виділяється з другого скрубєру:

$$m_{10} = 38544 - 38505,5 = 38,5 \text{ кг/рік.}$$

Концентрація SO_2 після другого скрубєру:

$$C_{\text{скруб II}} = 38,5 / 385440 \cdot 10^3 = 0,099 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3 \approx 0,1 \text{ мг/м}^3.$$

Отже, концентрація SO_2 нижче гранично допустимої концентрації.

Технологічна схема вибрана правильно.

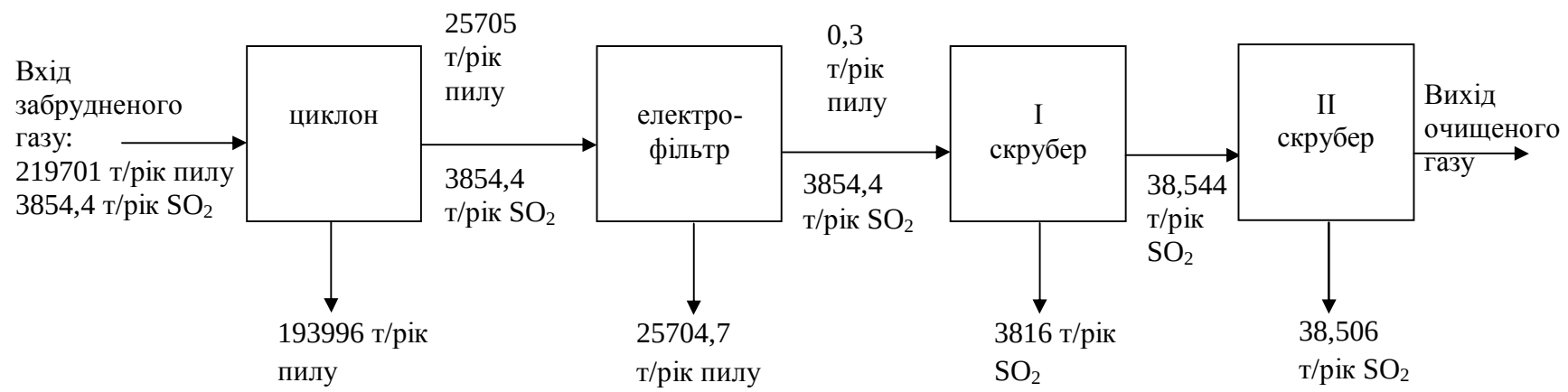


Рис.1. Блок-схема матеріального балансу очисних споруд.

4.2. Визначення розмірів пилоосаджувальної камери

Пилоосаджувальні камери (рис.2) представляють собою пустотілі або з горизонтальними полицями камери, які виготовляють з цегли, залізобетону або сталі. Для досягнення прийнятної ефективності очищення газів необхідно, щоб частки пилу знаходились в камері якнайбільше часу, що обумовлює громіздкість споруд.

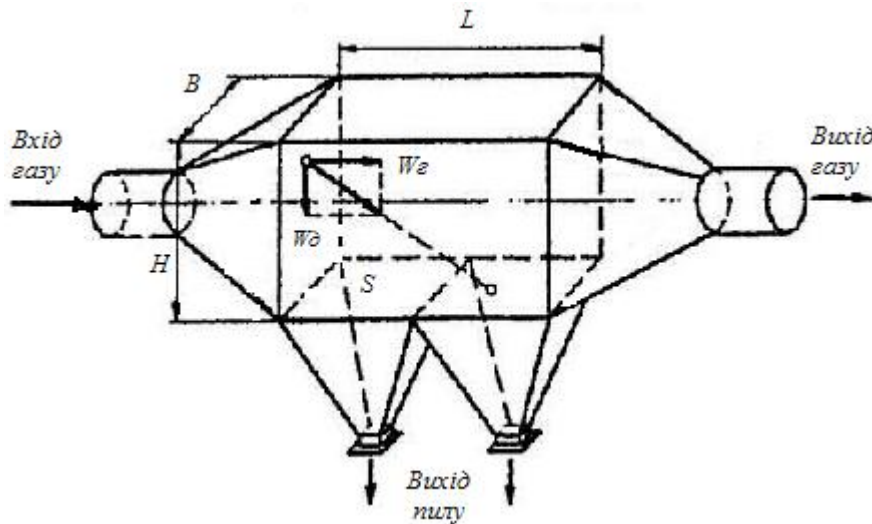


Рис.2. Пилоосаджувальна камера.

Розраховуємо швидкість осадження пилових часток:

$$w_d = (d_c^2 \cdot \rho \cdot g) / (18 \cdot \mu) \text{ [м/с]}, \quad (4.13)$$

де d_c – мінімальний діаметр часток пилу, які необхідно видалити з газу, мкм; ρ – щільність матеріалу пилу, кг/м³; μ – динамічна в'язкість, Н·с/м² (Па·с).

При цьому приймається, що пилові частки з розміром, більшим мінімального діаметра d_c , повністю вловлюються в пилоосаджувальній камері; частки по перерізу камери розподілені рівномірно; швидкість газу постійна; пилові частки, що осіли, не виносяться з камери.

Визначимо площу дна осадження камери:

$$S = V / w_d [m^2], \quad (4.14)$$

де V – витрата газу, $m^3/год$.

Приймаючи швидкість газу в камері в горизонтальному напрямку $w_r = 1-2$ м/с, при якій осаджуються часточки пилу розміром більше ніж 30-40 мкм, знайдемо площу вертикального перерізу камери:

$$S_1 = V / 3600 \cdot w_r [m^2]. \quad (4.15)$$

Приймаючи потрібну висоту камери H , ширина камери становитиме:

$$B = S_1 / H [m]. \quad (4.16)$$

Довжина камери:

$$L = S / B [m]. \quad (4.17)$$

З формул зрозуміло, що при інших рівних умовах мінімальний розмір затриманих часток залежить від площі дна камери:

$$S = L \cdot B [m^2]. \quad (4.18)$$

При збільшенні площі збільшується термін перебування часток в камері, а відповідно, і ефективність їх осадження. Проте збільшення площі дна камери приводить до збільшення її габаритних розмірів та вартості.

Ефективність пиловловлення:

$$\eta = (w_d \cdot L / w_r \cdot H) \cdot 100 \% [\%]. \quad (4.19)$$

Для підвищення ефективності пиловловлювання іноді в камерах встановлюють горизонтальні полиці, при цьому не спостерігається збільшення габариту камери, тому що збільшується добуток $L \cdot B$. На практиці виявилось, що полиці незначно підвищують ефективність

осадження часток, тому що при видаленні пилю з полок частина часток, що на них осіли, виноситься з газовим потоком.

Для визначення швидкості осадження часток можна скористатися такими експериментальними даними з табл. 1:

Таблиця 1. – Залежність швидкості осадження часток від їх діаметру.

Діаметр часток, мкм	Швидкість осадження, см/с
0,1	$8,7 \cdot 10^{-5}$
0,2	$2,3 \cdot 10^{-4}$
0,4	$6,8 \cdot 10^{-4}$
1	$3,5 \cdot 10^{-3}$
2	$1,19 \cdot 10^{-2}$
4	$5,1 \cdot 10^{-2}$
10	$3,06 \cdot 10^{-1}$
20	1,2
40	4,8
100	24,6
400	157,0
1000	382,0

Розглянемо на прикладі:

Вхідні параметри:

діаметр часток $d_{\text{ч}} > 80 \text{ мкм} = 80 \cdot 10^{-6} \text{ м}$;

витрата газу $V = 30000 \text{ м}^3/\text{год}$;

щільність часток пилю $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$;

динамічна в'язкість газу $\mu = 20,8 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$.

Розраховуємо швидкість осадження пилових часток діаметром 80 мкм:

$$w_d = ((80 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2500 \cdot 9,81) / (18 \cdot 20,8 \cdot 10^{-6}) = 156800000 \cdot 10^{-12} / 374,4 \cdot 10^{-6} = 418803,4188 \cdot 10^{-6} = 0,42 \text{ м/с.}$$

Визначимо площу дна осадження камери:

$$S = 30000 / 3600 \cdot 0,42 = 19,84 \text{ м}^2.$$

Приймаючи швидкість газу в камері в горизонтальному напрямку $w_r = 1$ м/с, знайдемо площу вертикального перерізу камери:

$$S_1 = 30000 / 3600 \cdot 1 = 8,33 \text{ м}^2.$$

Вибираємо висоту камери рівною 2 м, при цьому її ширина становитиме:

$$B = 8,33 / 2 = 4,17 \text{ м.}$$

Довжина камери:

$$L = 19,84 / 4,17 = 4,76 \text{ м.}$$

Ефективність пиловловлення:

$$\eta = (0,42 \cdot 4,76 / 1 \cdot 2) \cdot 100 \% = 99,9 \%.$$

4.3. Розрахунок пилоосаджувальної камери

Розраховуємо швидкість потоку в перерізі пилоосаджувальної камери:

$$v = V / 3600 \cdot H \cdot B \text{ [м/с]}, \quad (4.20)$$

де V – витрата газу через камеру, $\text{м}^3/\text{год}$; H , B – висота та ширина камери, м.

Для часток, вловлених в камері з ефективністю 50%, знаходимо відносну

швидкість витання (w) з рівняння: $\left(\frac{w}{u}\right)_{50} = 1,5 \frac{H}{L}$. Звідси відносна

швидкість витання часток:

$$w_{50} = 1,5 \frac{H}{L} \cdot u \text{ [м/с]}, \text{ [см/с]}. \quad (4.21)$$

За номограмою, приведеною на рис.3, по розрахованій швидкості витання,

Діаметр часток, мкм

Швидкість витання, см/с

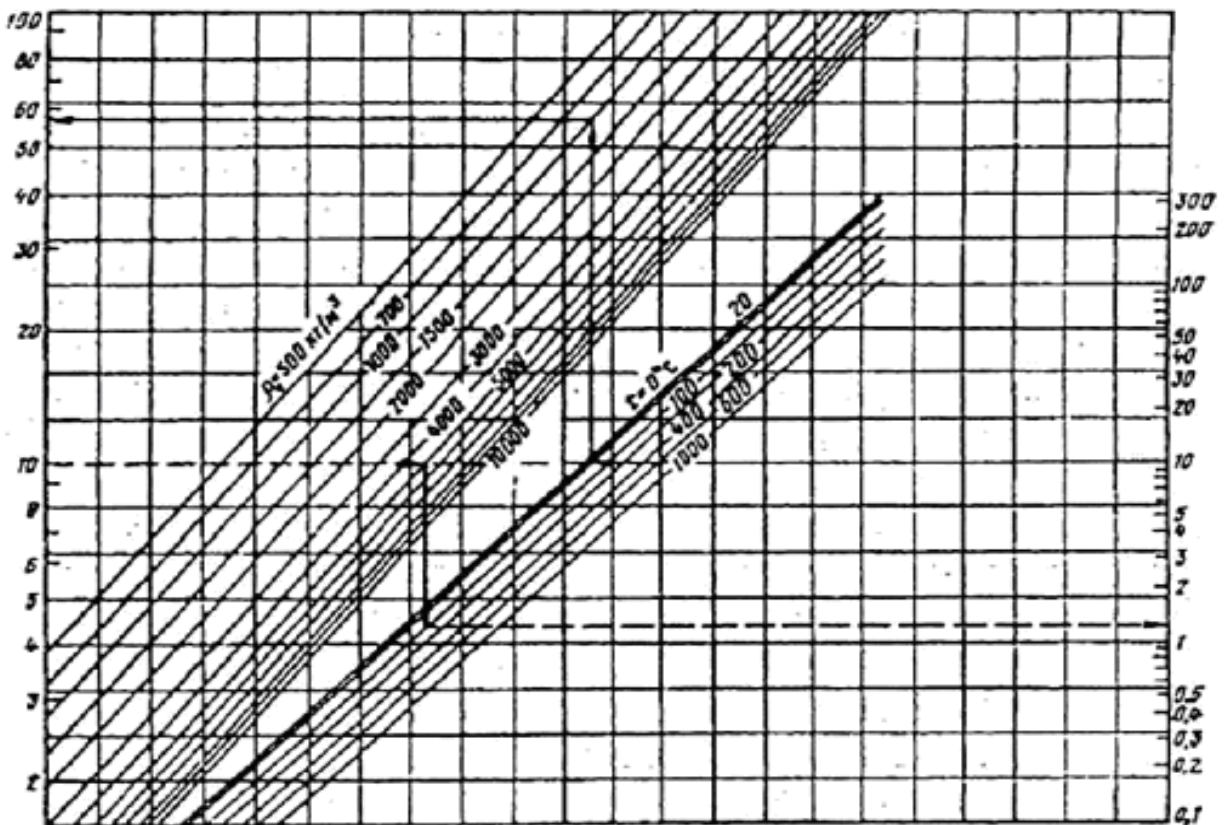


Рис.3. Номограма визначення діаметру часток.

заданій густині часток ρ та температурі t знаходимо розмір часток d_{50} , що видаляються в камері з ефективністю 50%. Для визначення залежності $\eta_n = f(d)$ вибираємо декілька додаткових відносних швидкостей витання часток w^1 і w^2 , для цього приймаємо більше та менше значення $\left(\frac{w}{u}\right)_{50}$. По номограмі знаходимо діаметр часток d_1 та d_2 відповідно значенням швидкостей витання.

Середня концентрація часток на виході з камери визначається як середня величина в 4-5 точках перетину. З цією метою задаємося 5-ма значеннями $h/H = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$. При цьому h – відстань від стелі камери, м. Результат розрахунків представляємо у наступному вигляді для кожного $\left(\frac{w}{u}\right)$:

h/H	0	0,25	0,5	0,75	1,0
x_1					
x_2					
$\Phi(x_1)$					
$\Phi(x_2)$					
n					

$$\text{При цьому } x_1 = \frac{1 + (h/H) - (L/H) \cdot (w/u)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} (L/H)}}; \quad (4.22)$$

$$x_2 = \frac{1 - (h/H) + (L/H) \cdot (w/u)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} (L/H)}}. \quad (4.23)$$

$\Phi(x_1)$ і $\Phi(x_2)$ знаходимо з таблиці нормальної функції розподілу (табл.2), значення n - за формулою: $n = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1$.

Таблиця 2. – Значення нормальної функції розподілу.

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1	2	3	4	5	6	7	8
-2,70	0,0035	-1,06	0,1446	0,00	0,5000	1,08	0,8599
-2,60	0,0047	-1,04	0,1492	0,02	0,5080	1,10	0,8643
-2,50	0,0062	-1,02	0,1539	0,04	0,5160	1,12	0,8686
-2,40	0,0082	-1,00	0,1587	0,06	0,5239	1,14	0,8729
-2,30	0,0107	-0,98	0,1635	0,08	0,5319	1,16	0,8770
-2,20	0,0139	-0,96	0,1685	0,10	0,5398	1,18	0,8810
-2,10	0,0179	-0,94	0,1736	0,12	0,5478	1,20	0,8849
-2,00	0,0228	-0,92	0,1788	0,14	0,5557	1,22	0,8888
-1,98	0,0239	-0,90	0,1841	0,16	0,5636	1,24	0,8925
-1,96	0,0250	-0,88	0,1894	0,18	0,5714	1,26	0,8962
-1,94	0,0262	-0,86	0,1949	0,20	0,5793	1,28	0,8997
-1,92	0,0274	-0,84	0,2005	0,22	0,5871	1,30	0,9032
-1,90	0,0288	-0,82	0,2061	0,24	0,5948	1,32	0,9066
-1,88	0,0301	-0,80	0,2119	0,26	0,6026	1,34	0,9099
-1,86	0,0314	-0,78	0,2177	0,28	0,6103	1,36	0,9131
-1,84	0,0329	-0,76	0,2236	0,30	0,6179	1,38	0,9162
-1,82	0,0344	-0,74	0,2297	0,32	0,6255	1,40	0,9192
-1,80	0,0359	-0,72	0,2358	0,34	0,6331	1,42	0,9222
-1,78	0,0375	-0,70	0,2420	0,36	0,6406	1,44	0,9251
-1,76	0,0392	-0,68	0,2483	0,38	0,6480	1,46	0,9279
-1,74	0,0409	-0,66	0,2546	0,40	0,6554	1,48	0,9306
-1,72	0,0427	-0,64	0,2611	0,42	0,6628	1,50	0,9332
-1,70	0,0446	-0,62	0,2676	0,44	0,6700	1,52	0,9357
-1,68	0,0465	-0,60	0,2743	0,46	0,6772	1,54	0,9382
-1,66	0,0485	-0,58	0,2810	0,48	0,6844	1,56	0,9406
-1,64	0,0505	-0,56	0,2877	0,50	0,6915	1,58	0,9429
-1,62	0,0526	-0,54	0,2946	0,52	0,6985	1,60	0,9452
-1,60	0,0548	-0,52	0,3015	0,54	0,7054	1,62	0,9474
-1,58	0,0571	-0,50	0,3085	0,56	0,7123	1,64	0,9495
-1,56	0,0594	-0,48	0,3156	0,58	0,7190	1,66	0,9515
-1,54	0,0618	-0,46	0,3228	0,60	0,7257	1,68	0,9535

Продовження таблиці 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
-1,52	0,0643	-0,44	0,3300	0,62	0,7324	1,70	0,9554
-1,50	0,0668	-0,42	0,3372	0,64	0,7389	1,72	0,9573
-1,48	0,0694	-0,40	0,3446	0,66	0,7454	1,74	0,9591
-1,46	0,0721	-0,38	0,3520	0,68	0,7517	1,76	0,9608
-1,44	0,0749	-0,36	0,3594	0,70	0,7580	1,78	0,9625
-1,42	0,0778	-0,34	0,3669	0,72	0,7642	1,80	0,9641
-1,40	0,0808	-0,32	0,3745	0,74	0,7703	1,82	0,9656
-1,38	0,0838	-0,30	0,3821	0,76	0,7764	1,84	0,9671
-1,36	0,0869	-0,28	0,3897	0,78	0,7823	1,86	0,9686
-1,34	0,0901	-0,26	0,3974	0,80	0,7881	1,88	0,9699
-1,32	0,0934	-0,24	0,4052	0,82	0,7939	1,90	0,9713
-1,30	0,0968	-0,22	0,4129	0,84	0,7995	1,92	0,9726
-1,30	0,0968	-0,20	0,4207	0,86	0,8051	1,94	0,9738
-1,28	0,1003	-0,18	0,4286	0,88	0,8106	1,96	0,9750
-1,26	0,1038	-0,16	0,4364	0,90	0,8159	1,98	0,9761
-1,24	0,1075	-0,16	0,4364	0,92	0,8212	2,00	0,9772
-1,22	0,1112	-0,14	0,4443	0,94	0,8264	2,10	0,9821
-1,20	0,1151	-0,12	0,4522	0,96	0,8315	2,20	0,9861
-1,18	0,1190	-0,10	0,4602	0,96	0,8315	2,30	0,9893
-1,16	0,1230	-0,08	0,4681	0,98	0,8365	2,40	0,9918
-1,14	0,1271	-0,06	0,4761	1,00	0,8413	2,50	0,9938
-1,12	0,1314	-0,04	0,4840	1,02	0,8461	2,60	0,9953
-1,10	0,1357	-0,02	0,4920	1,04	0,8508	2,70	0,9965
-1,08	0,1401	-0,00	0,5000	1,06	0,8554		

Після визначення середнього значення $n_{\text{сер}}$ розраховуємо парціальний коефіцієнт очищення газу для камер з $L/H > 3$ за формулою для трьох значень $\left(\frac{w}{u}\right)$:

$$\eta_n = 100 \cdot (1 - n_{\text{сер}}) \cdot 100 \% [\%]. \quad (4.24)$$

Розглянемо на прикладі:

Вхідні параметри:

довжина $L = 15$ м;

висота $H = 1,5$ м;

ширина $B = 3$ м;

витрата повітря $V = 15000$ м³/год;

густина часток $\rho = 2400$ кг/м³;

температура $t = 0$ °С.

Розраховуємо швидкість потоку в перерізі пилоосаджувальної камери:

$$v = 15000 / 3600 \cdot 1,5 \cdot 3 = 0,93 \text{ м/с.}$$

Для часток, вловлених з ефективністю 50%, знаходимо відносну швидкість

витання (w) з рівняння: $\left(\frac{w}{u}\right)_{50} = 1,5 \frac{1,5}{15} = 0,15.$

Звідси відносна швидкість витання часток:

$$w_{50} = 0,15 \cdot 0,93 = 0,14 \text{ м/с} = 14 \text{ см/с.}$$

За номограмою на рис.3 знаходимо розмір часток d_{50} , що видаляються в камері з ефективністю 50%: $d_{50} = 40$ мкм.

Додаткові значення $\left(\frac{w}{u}\right)$, необхідні для визначення декількох точок

залежності $\eta_n = f(d)$, приймаємо більше або менше значення $\left(\frac{w}{u}\right)_{50}$:

$$\left(\frac{w^1}{u}\right) = 0,1; \left(\frac{w^2}{u}\right) = 0,2 .$$

Знаходимо відносну швидкість витання часток:

$$w^1 = 0,1 \cdot 0,93 = 0,09 \text{ м/с} = 9 \text{ см/с};$$

$$w^2 = 0,2 \cdot 0,93 = 0,19 \text{ м/с} = 19 \text{ см/с}.$$

За номограмою на рис.3 знаходимо відповідний діаметр вловлених часток:

$$d_1 = 30 \text{ мкм}; d_2 = 45 \text{ мкм}.$$

Подальші результати розрахунків представляємо у наступному вигляді для

$$\left(\frac{w^1}{u} \right) = 0,1 :$$

h/H	0	0,25	0,5	0,75	1
x ₁	0	0,943396	1,886792	2,830189	3,773585
x ₂	7,54717	6,603774	5,660377	4,716981	3,773585
Φ(x ₁)	0,5	0,8413	0,9713	1	1
Φ(x ₂)	1	1	1	1	1
n	0,5	0,8413	0,9713	1	1

Середнє значення $n_{\text{сер}} = 0,8106$, а парціальний коефіцієнт очищення газу для часток розміром $d = 30 \text{ мкм}$ $\eta_n = 100 \cdot (1 - 0,8106) = 19 \%$.

Таким чином, в результаті розрахунку повинні бути отримані три значення парціальних коефіцієнтів очищення газу при трьох значеннях $\left(\frac{w}{u} \right)$

4.4. Розрахунок та вибір циклона

До циліндричних циклонів відносяться циклони типу ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У та ЦН-24 (рис.4, табл.4). Характерними особливостями апаратів цієї групи є наявність подовженої циліндричної частини, кут нахилу кришки та вхідного патрубку – відповідно 11, 15 та 24° і однакове співвідношення діаметру вихлопної труби до діаметру циклона, що складає 0,59. Циклон типу ЦН-15У має меншу висоту.

До конічних відносяться циклони типу СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34 та СК-ЦН-22 (рис.5, табл.5). Вони характеризуються довгою конічною частиною, спіральним вхідним патрубком та малим відношенням діаметрів вихлопної труби та корпусу циклонів відповідно 0,33; 0,34 та 0,22. Циклон типу СК-ЦН-22 застосовується для уловлення пилу, що відрізняється підвищеною абразивністю та схильністю до злипання. Втрати тиску в цьому апараті значно вище, ніж в інших конічних циклонах. Звичайно діаметр циліндричних циклонів не перевищує 2000 мм, а конічних – 3000 мм. Задавшись типом циклона по табл.3, визначаємо оптимальну швидкість газу в апараті $v_{\text{опт}}$.

Таблиця 3. – Параметри, що визначають ефективність циклонів.

Параметри	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
$d_{\eta=50}^*$, мкм	8,50	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95	1,13
σ_{η}^T	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340
$v_{\text{опт}}$, м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0

* Значення $d_{\eta=50}^T$, що наведені в таблиці, відповідають наступним умовам роботи циклона: середня швидкість газу в циклоні $v=3,5$ м/с; діаметр циклона $D = 0,6$ м; густина часток $\rho = 1930$ кг/м³; динамічна в'язкість газу $\mu = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Н·с/м².

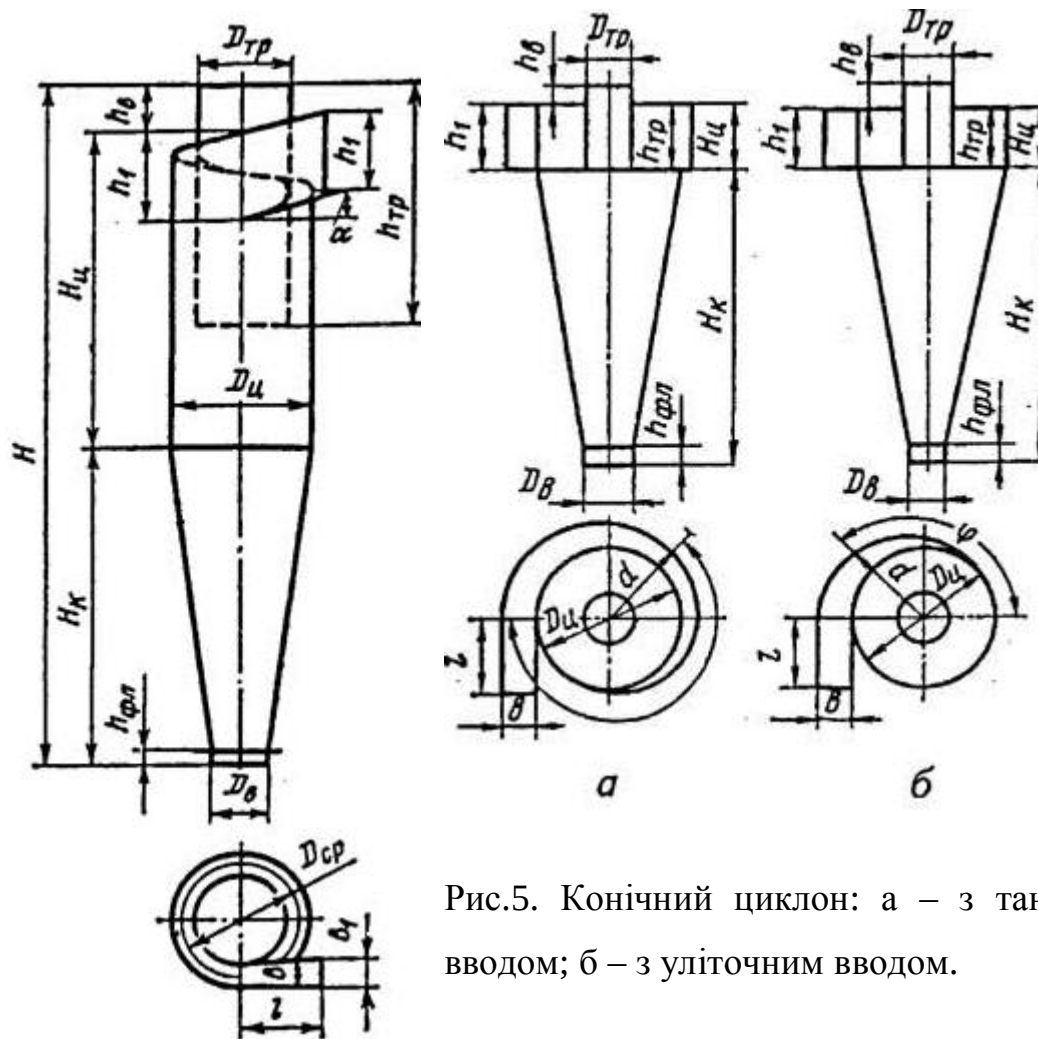


Рис.5. Конічний циклон: а – з тангенційним вводом; б – з уліточним вводом.

Рис.4. Циліндричний циклон.

Розраховуємо необхідну площу перерізу циклону за формулою :

$$F = \frac{V}{u_{opt}} \text{ [м}^2\text{]}, \quad (4.24)$$

де V – витрата газу, м³/с.

Визначаємо діаметр циклона, задаючись кількістю циклонів N :

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785N}} \text{ [м]}. \quad (4.25)$$

Діаметр циклона округлюємо до величини, що рекомендується в табл.5, 6, 7.

Обчислюємо дійсну швидкість газу в циклоні за формулою :

$$u = \frac{V}{0,785ND^2} \text{ [м/с]}. \quad (4.26)$$

Швидкість в циклоні не повинна відхилятися більш ніж на 15 % від оптимальної.

Таблиця 4.- Співвідношення розмірів в долях внутрішнього діаметру D для циклонів ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У та ЦН-24.

Найменування	Тип циклона			
	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24	ЦН-11
Внутрішній діаметр вихлопної труби $d_{тр}$	0,59 для всіх типів			
Внутрішній діаметр пиловипускного отвору d_1	0,3-0,4 для всіх типів*			
Ширина вхідного патрубку в циклоні (внутрішній розмір) b	0,2 для всіх типів			
Ширина вхідного патрубку на вході (внутрішній розмір) b_1	0,26 для всіх типів			
Довжина вхідного патрубку l	0,6 для всіх типів			
Діаметр середньої лінії циклона $D_{сер}$	0,8 для всіх типів			
Висота встановлення фланця $h_{фл}$	0,1 для всіх типів			
Кут нахилу кришки та вхідного патрубку циклона α , град	15	15	24	11
Висота вхідного патрубку a (h_1)	0,66	0,66	1,11	0,48
Висота вихлопної труби $h_{тр}$	1,74	1,5	2,11	1,56
Висота циліндричної частини циклона $H_{ц}$	2,26	1,51	2,11	2,06
Висота конуса циклона $H_{к}$	2	1,5	1,75	2,0
Висота зовнішньої частини вихлопної труби $h_{в}$	0,3	0,3	0,4	0,3
Загальна висота циклона H	4,56	3,31	4,26	4,38

*Більший розмір приймається при малих D та високій запиленості.

Таблиця 5. - Співвідношення розмірів в долях внутрішнього діаметру D для циклонів СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34 та СК-ЦН-34М.

Найменування	Тип циклона		
	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
Внутрішній діаметр циліндричної частини $D_{\text{ц}}$	$> 3000 \text{ мм}$		$> 4000 \text{ мм}$
Висота циліндричної частини циклона $H_{\text{ц}}$	0,535	0,515	0,4
Висота конічної частини циклона $H_{\text{к}}$	3,0	2,110	2,6
Внутрішній діаметр вихлопної труби d	0,334	0,340	0,22
Внутрішній діаметр пиловипускного отвору d_1	0,334	0,229	0,18
Ширина вхідного патрубку в циклоні b	0,264	0,214	0,18
Висота зовнішньої частини вихлопної труби $h_{\text{в}}$	0,2-0,3	0,515	0,3
Висота встановлення фланця $h_{\text{фл}}$	0,1	0,1	0,1
Висота вхідного патрубку h_1	0,535	0,2-0,3	0,4
Довжина вхідного патрубку l	0,6	0,6	0,6
Висота заглиблення вихлопної труби $h_{\text{тр}}$	0,535	0,515	0,4
Радіус “улітки” $^* r$	$D/2+b\phi/2\pi$	$D/2+b\phi/\pi$	

*”Улітка” – пристрій, що встановлюється на вихідній трубі для випрямлення газового потоку.

Таблиця 6. – Технічна характеристика типорозмірного ряду циклонів ЦН-15.

Типорозмір циклона*	Код ОКП	Площа перерізу циліндричної частини корпусу (групи корпусів), м^2	Продуктивність, $\text{м}^3/\text{год}$		Робочий об'єм бункеру, м^3	Вага, кг
			при $v = 2,5 \text{ м/с}$	при $v = 3,5 \text{ м/с}$		
1	2	3	4	5	6	7
ЦН-15-300П	36 4651 1006	0,070	612	864	0,17	208
ЦН-15-400П	36 4651 1007	0,125	1123	1573	0,146	275
ЦН-15-500П	36 4651 1008	0,196	1764	2470	0,205	385

Продовження табл.6.

1	2	3	4	5	6	7
ЦН-15-600П	36 4651 1009	0,282	2538	3553	0,327	520
ЦН-15-700П	36 4651 1011	0,384	3450	4838	0,465	660
ЦН-15-800П	36 4651 2004	0,502	4518	6325	0,56	825
ЦН-15-900П	36 4651 2005	0,635	5713	8000	0,64	1010
ЦН-15-1000П	36 4651 2006	0,785	7063	9889	0,72	1195
ЦН-15-1200П	36 4651 3004	1,130	10152	14220	1,07	1630
ЦН-15-1400П	36 4651 3005	1,538	13842	19378	1,42	2180
ЦН-15-300×2УП	36 4652 1004	0,140	1224	1728	0,2	277
ЦН-15-300×2СП	36 4652 1003	0,140	1224	1728	0,2	307
ЦН-15-400×2УП	36 4652 1008	0,250	2246	3146	0,31	456
ЦН-15-400×2СП	36 4652 1007	0,250	2246	3146	0,31	475
ЦН-15-500×2УП	36 4652 1010	0,392	3528	4940	0,5	680
ЦН-15-500×2СП	36 4652 1011	0,392	3528	4940	0,5	675
ЦН-15-600×2УП	36 4652 1016	0,564	5076	7106	0,595	890
ЦН-15-600×2СП	36 4652 1015	0,564	5076	7106	0,595	870
ЦН-15-700×2УП	36 4652 2004	0,768	6900	9676	0,825	1140
ЦН-15-700×2СП	36 4652 2003	0,768	6900	9676	0,825	1110
ЦН-15-800×2УП	36 4652 2008	1,004	9036	12650	1,15	1475
ЦН-15-800×2СП	36 4652 2007	1,004	9036	12650	1,15	1430
ЦН-15-900×2УП	36 4652 3004	1,270	11426	15998	1,45	1830
ЦН-15-900×2СП	36 4652 3003	1,270	11426	15998	1,45	1760
ЦН-15-400×4УП	36 4652 2012	0,500	4492	6992	0,54	850
ЦН-15-400×4СП	36 4652 2011	0,500	4492	6992	0,54	840
ЦН-15-500×4УП	36 4652 2016	0,784	7056	9880	0,77	1225
ЦН-15-500×4СП	36 4652 2015	0,784	7056	9880	0,77	1165
ЦН-15-600×4УП	36 4652 2020	1,128	10152	14212	1,11	1700
ЦН-15-600×4СП	36 4652 2019	1,128	10152	14212	1,11	1615
ЦН-15-700×4УП	36 4652 3008	1,536	13800	19352	1,5	2210
ЦН-15-700×4СП	36 4652 3007	1,536	13800	19352	1,5	2130

Продовження табл.6.

1	2	3	4	5	6	7
ЦН-15-800×4УП	36 4652 3012	2,008	18072	25300	2,27	2870
ЦН-15-800×4СП	36 4652 3011	2,008	18072	25300	2,27	2760
ЦН-15-900×4УП	36 4652 3016	2,540	22852	31996	2,28	3610
ЦН-15-900×4СП	36 4652 3015	2,540	22852	31996	2,28	3450
ЦН-15-500×6УП	36 4652 3018	1,176	10584	14820	1,3	1960
ЦН-15-500×6СП	36 4652 3017	1,176	10584	14820	1,3	1900
ЦН-15-600×6УП	36 4652 3021	1,692	15228	21318	2,0	2720
ЦН-15-600×6СП	36 4652 3020	1,692	15228	21318	2,0	2640
ЦН-15-700×6УП	36 4652 3023	2,304	20700	29028	2,67	3550
ЦН-15-700×6СП	36 4652 3022	2,304	20700	29028	2,67	3430
ЦН-15-800×6УП	36 4652 3025	3,012	27108	37950	3,82	4640
ЦН-15-800×6СП	36 4652 3024	3,012	27108	37950	3,82	4440
ЦН-15-900×6УП	36 4652 4002	3,810	34278	47994	5,55	5810
ЦН-15-900×6СП	36 4652 4001	3,810	34278	47994	5,55	5580
ЦН-15-500×8УП	36 4652 3027	1,568	14112	19760	2,33	2720
ЦН-15-500×8СП	36 4652 3026	1,568	14112	19760	2,33	2640
ЦН-15-1400	31 1338 2119	1,538	17000-20000		-	2,418
ЦН-15-1800	31 1338 2121	2,543	28000-32000		-	3,949
ЦН-15-2000	31 1338 2122	3,140	32000-38000		-	5,163

* ЦН-15 – $D_{\text{цикл}} \times N_{\text{цикл}}$, де N – кількість циклонів в груповому циклоні.

Розраховуємо коефіцієнт гідравлічного опору циклона або групи циклонів за формулою:

$$\xi_{\text{ц}} = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{\text{ц}500}^{C(\Pi)} + K_3, \quad (4.27)$$

де $\xi_{\text{ц}500}^{C(\Pi)}$ – коефіцієнт гідравлічного опору циклона діаметром 500 мм, що вибирається за табл.8. Індекс “С” означає, що циклон працює в гідравлічній мережі, “П” – без мережі, тобто прямо на викид в атмосферу;

Таблиця 7. – Рекомендації по компоновці циклонів типу ЦН в групи.

Діаметр циклона, мм	Кількість циклонів в групі при компоновці*						
	прямокутній				круговий		
	2	4	6	8	10	12	14
200	П	П	П	П	-	-	-
300	О	О	О	О	-	-	-
400	П	П	П	П	-	-	-
500	О	О	О	О	-	-	-
600	П	П	П	П	П	П	П
700	О	О	О	О	-	-	-
800	П	П	П	П	П	П	П
900	П	П	П	П	-	-	-
1000	П	П	П	П	П	П	П
1200	П	П	-	-	-	-	-
1400	П	П	-	-	-	-	-
1600	П	П	-	-	-	-	-
1800	П	П	-	-	-	-	-

*П – групи, що рекомендовані до застосування; О – групи обмеженого застосування. Для груп з двох та чотирьох циклонів застосовують круглу або прямокутну форму пилових бункерів, з шести та восьми – тільки прямокутну.

K_1 – поправочний коефіцієнт на діаметр циклона, що визначається за табл.9;

K_2 – поправочний коефіцієнт на запиленість газів, що визначається за табл.10;

K_3 – коефіцієнт, що враховує додаткові втрати тиску, пов'язані з компоновкою циклонів в групу та визначається за табл.11.

Таблиця 8. – Значення коефіцієнтів опору циклонів (D = 500 мм; v = 3 м/с).

Тип циклона	d/D	Без додаткових пристроїв		З кільцевим дифуззором		З вихідною «уліткою», $\xi_{\text{ц}}^{\text{C}}$	З відводом 90° R/d = 1,5	
		$\xi_{\text{ц}}^{\text{C}}$	$\xi_{\text{ц}}^{\text{П}}$	$\xi_{\text{ц}}^{\text{C}}$	$\xi_{\text{ц}}^{\text{П}}$		l/d = 0÷12 $\xi_{\text{ц}}^{\text{C}}$	l/d >12 $\xi_{\text{ц}}^{\text{C}}$
ЦН-11	0,59	245	250	207	215	235	245	250
ЦН-15	0,59	155	163	132	140	150	155	160
ЦН-15У	0,59	165	170	140	148	158	165	170
ЦН-24	0,59	75	80	64	70	73	75	80
СДК-ЦН-33	0,33	520	600	-	-	500	-	560
СК-ЦН-34	0,34	1050	1150	-	-	-	-	-
СК-ЦН-34М	0,22	-	2000	-	-	-	-	-

Таблиця 9. - Поправочний коефіцієнт K_1 на діаметр циклона.

Діаметр циклона, мм	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24	СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М
150	0,94	0,85	1,0
200	0,95	0,90	1,0
300	0,96	0,93	1,0
400	0,99	1,0	1,0
500	1,0	1,0	1,0

Визначаємо втрати тиску в циклоні, виходячи з формули:

$$\Delta P = x_{\text{ц}} \cdot \frac{r_{\text{ц}} u^2}{2} \text{ [Па]}. \quad (4.28)$$

Якщо втрати тиску є прийнятними, переходимо до розрахунку повного коефіцієнту очищення газу в циклоні. При цьому приймається, що коефіцієнт очищення газу в одиночному циклоні та в групі циклонів

Таблиця 10. – Значення поправочних коефіцієнтів K_2 на запиленість газів ($D = 500$ мм).

Тип циклона	Поправочний коефіцієнт при запиленості газу, 10^3 кг/м ³						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,5
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
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК-ЦН-34М	1	0,99	0,97	0,95	-	-	-

Таблиця 11. - Коефіцієнт K_3 , що враховує додаткові втрати тиску, пов'язані з компоновкою циклонів в групу

Характеристика групового циклона	Значення коефіцієнта
Кругова компоновка, нижній організований підвід	60
Прямокутна компоновка, організований підвід, циклонні елементи розташовані в одній площині	35
Те ж, але "уліточний" відвід з циклонних елементів	28
Прямокутна компоновка, вільний підвід потоку в загальну камеру	60
Для одиночних циклонів $K_3 = 0$	

однаковий. В дійсності, коефіцієнт очищення газу в групі циклонів може бути нижчий, ніж в одиночному циклоні. Це пояснюється можливістю виникнення перетоків газу через загальний бункер, що зменшує коефіцієнт очищення газу в групі циклонів.

Використовуючи дані з табл.3, зокрема значення $d_{\eta=50}^T$, розраховуємо еквівалентний діаметр часток $d_{\eta=50}$, що вловлюються в циклоні з ефективністю 50 % при робочих умовах, виходячи з рівняння:

$$d_{\eta=50} = d_{\eta=50}^T \cdot \sqrt{\frac{D}{D_T}} \cdot \sqrt{\frac{r_T}{r}} \cdot \sqrt{\frac{m}{m_T}} \cdot \sqrt{\frac{u_T}{u}} \text{ [мкм]}, \quad (4.29)$$

де D – діаметр циклона, м; ρ – густина часток пилу, кг/м^3 ; μ – динамічна в'язкість газу, $\text{Н}\cdot\text{с/м}^2$; u – швидкість газу в циклоні, м/с. Значення величин з індексом “Т” відповідає еталонним умовам, визначеним в табл.3.

Враховуючи, що уловлення часток пилу підпорядковується логарифмічно нормальному розподілу, потрібно визначити параметр “х” функції розподілу $\Phi(x)$:

$$x = \frac{\lg \frac{d_m}{d_{h=50}}}{\sqrt{\lg^2 \sigma + \lg^2 \sigma^T}}, \quad (4.30)$$

де d_m – медіанний діаметр часток пилу (діаметр, при якому кількість часток більше d_m дорівнює кількості часток менше d_m), мкм; $\lg d_{\eta}^T$ – значення параметру з табл.3; σ – стандартне відхилення, що характеризує дисперсний склад пилу.

$\Phi(x)$ знаходимо з таблиці нормальної функції розподілу (табл.12), де інтеграл табульований в межах від 0 до x .

Загальну ефективність вловлювання часток в циклоні визначаємо за рівнянням: $\eta = 50 (1 + \Phi(x))$ [%].

В разі необхідності визначення фракційних ступенів очищення для кожної фракції, використовуючи фракційний діаметр часток замість медіанного та приведену вище формулу для визначення параметру “х”, знаходимо $\Phi(x)_i$ та ступінь очищення для кожної фракції η_i . Знаючи величину η_i та масовий

Таблиця 12. – Значення нормальної функції розподілу (інтеграла вірогідності)

$$\Phi(x) = \frac{100}{\sqrt{2p}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt .$$

х	Φ(х)	х	Φ(х)	х	Φ(х)	х	Φ(х)
1	2	3	4	5	6	7	8
0,01	0,0080	0,61	0,4581	1,21	0,7737	1,81	0,9297
0,02	0,0160	0,62	0,4647	1,22	0,7775	1,82	0,9312
0,03	0,0239	0,63	0,4713	1,23	0,7813	1,83	0,9328
0,04	0,0319	0,64	0,4778	1,24	0,7850	1,84	0,9342
0,05	0,0399	0,65	0,4843	1,25	0,7887	1,85	0,9357
0,06	0,0478	0,66	0,4907	1,26	0,7923	1,86	0,9371
0,07	0,0558	0,67	0,4971	1,27	0,7959	1,87	0,9385
0,08	0,0638	0,68	0,5035	1,28	0,7995	1,88	0,9399
0,09	0,0717	0,69	0,5098	1,29	0,8029	1,89	0,9412
0,10	0,0797	0,70	0,5161	1,30	0,8064	1,90	0,9426
0,11	0,0876	0,71	0,5223	1,31	0,8098	1,91	0,9439
0,12	0,0955	0,72	0,5285	1,32	0,8132	1,92	0,9451
0,13	0,1034	0,73	0,5346	1,33	0,8163	1,93	0,9464
0,14	0,1113	0,74	0,5407	1,34	0,8198	1,94	0,9476
0,15	0,1192	0,75	0,5467	1,35	0,8230	1,95	0,9488
0,16	0,1271	0,76	0,5527	1,36	0,8262	1,96	0,9500
0,17	0,1350	0,77	0,5587	1,37	0,8293	1,97	0,9512
0,18	0,1428	0,78	0,5646	1,38	0,8324	1,98	0,9523
0,19	0,1507	0,79	0,5705	1,39	0,8355	1,99	0,9534
0,20	0,1585	0,80	0,5763	1,40	0,8385	2,00	0,9545
0,21	0,1663	0,81	0,5821	1,41	0,8415	2,05	0,9596
0,22	0,1741	0,82	0,5878	1,42	0,8444	2,10	0,9643
0,23	0,1819	0,83	0,5935	1,43	0,8475	2,15	0,9684
0,24	0,1897	0,84	0,5991	1,44	0,8501	2,20	0,9722
0,25	0,1974	0,85	0,6047	1,45	0,8529	2,25	0,9756

Продовження табл.12.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,26	0,2051	0,86	0,6102	1,46	0,8557	2,30	0,9786
0,27	0,2128	0,87	0,6157	1,47	0,8554	2,35	0,9812
0,28	0,2205	0,88	0,6211	1,48	0,8611	2,40	0,9836
0,29	0,2282	0,89	0,6265	1,49	0,8638	2,45	0,9857
0,30	0,2358	0,90	0,6319	1,50	0,8664	2,50	0,9876
0,31	0,2434	0,91	0,6372	1,51	0,8690	2,55	0,9892
0,32	0,2510	0,92	0,6424	1,52	0,8715	2,60	0,9907
0,33	0,2586	0,93	0,6475	1,53	0,8740	2,65	0,9920
0,34	0,2661	0,94	0,6528	1,54	0,8764	2,70	0,9931
0,35	0,2737	0,95	0,6579	1,55	0,8789	2,75	0,9940
0,36	0,2812	0,96	0,6629	1,56	0,8812	2,80	0,9949
0,37	0,2886	0,97	0,6680	1,57	0,8836	2,85	0,9956
0,38	0,2961	0,98	0,6729	1,58	0,8859	2,90	0,9963
0,39	0,3035	0,99	0,6778	1,59	0,8882	2,95	0,9968
0,40	0,3108	1,00	0,6827	1,60	0,8904	3,00	0,9973
0,41	0,3182	1,01	0,6875	1,61	0,8926	3,10	0,99806
0,42	0,3255	1,02	0,6923	1,62	0,8948	3,20	0,99863
0,43	0,3328	1,03	0,6970	1,63	0,8969	3,30	0,99903
0,44	0,3401	1,04	0,7017	1,64	0,8990	3,40	0,99933
0,45	0,3473	1,05	0,7063	1,65	0,9011	3,50	0,99953
0,46	0,3545	1,06	0,7109	1,66	0,9031	3,60	0,99968
0,47	0,3616	1,07	0,7154	1,67	0,9051	3,70	0,99978
0,48	0,3688	1,08	0,7199	1,68	0,9070	3,80	0,99986
0,49	0,3759	1,09	0,7243	1,69	0,9090	3,90	0,99990
0,50	0,3829	1,10	0,7287	1,70	0,9109	4,00	0,99994
0,51	0,3899	1,11	0,7330	1,71	0,9127	4,417	0,99999
0,52	0,3969	1,12	0,7373	1,72	0,9146	4,892	0,999999
0,53	0,4039	1,13	0,7415	1,73	0,9164	5,327	0,9999999
0,54	0,4108	1,14	0,7457	1,74	0,9181		
0,55	0,4177	1,15	0,7499	1,75	0,9199		

Продовження табл.12.

1	2	3	4	5	6	7	8
0,56	0,4245	1,16	0,7540	1,76	0,9216		
0,57	0,4313	1,17	0,7580	1,77	0,9233		
0,58	0,4381	1,18	0,7620	1,78	0,9246		
0,59	0,4448	1,19	0,7660	1,79	0,9263		
0,60	0,4515	1,20	0,7699	1,80	0,9281		

вміст фракції Φ_i (в %) в складі пилу, можна визначити загальну ефективність очищення газу від пилу по залежності:

$$\eta = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n h_i \Phi_i [\%]. \quad (4.31)$$

Після закінчення розрахунків отримане значення η співставляють з потрібним для технологічної схеми. Якщо η виявляється менше потрібного, необхідно вибрати інший тип циклона, з більшим значенням коефіцієнта гідравлічного опору. Для орієнтовних підрахунків необхідного значення $\xi_{\text{ц}}$ рекомендується наступна залежність:

$$x_{u2} = x_{u1} \left(\frac{100 - h_1}{100 - h_2} \right) \cdot \frac{u_1}{u_2} \cdot \frac{D_2}{D_1}, \quad (4.32)$$

де індекс “1” відноситься до розрахованих, а індекс “2” – до потрібних параметрів циклона.

Розглянемо на прикладі:

Вхідні параметри:

витрата газу $V = 44000 \text{ м}^3/\text{год}$;

запиленість газу $C_{\text{поч}} = 30 \text{ г/м}^3$;

щільність газу $\rho_{\text{г}} = 1,38 \text{ кг/м}^3$;

динамічна в'язкість газу $\mu = 15,28 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$;

густина часток $\rho = 2400 \text{ кг}/\text{м}^3$;

стандартне відхилення $\sigma = 3,5$;

медіанний діаметр $d_m = 15 \text{ мкм}$;

склад пилу в газі перед циклоном:

$D_{\text{часток}}, \text{ мкм}$	5	10	15	25	50
Фракційний вміст часток $\Phi_i, \%$	12	18	40	22	8

Задавшись за табл.3 типом циклона ЦН-15, приймаємо оптимальну швидкість газу в апараті $v_{\text{опт}} = 3,5 \text{ м}/\text{с}$.

Розраховуємо необхідну площу перерізу циклона:

$$F = \frac{44000}{3,5 \cdot 3600} = 3,49 \text{ м}^2.$$

Визначаємо діаметр циклона, задаючись кількістю циклонів $N=6$:

$$D = \sqrt{\frac{3,49}{0,785 \cdot 6}} = 0,86 \text{ м}.$$

Діаметр циклона округлюємо за табл.6,7 до $D = 0,9 \text{ м}$.

Обчислюємо дійсну швидкість газу в групі циклонів за формулою :

$$u = \frac{44000}{3600 \cdot 0,785 \cdot 6 \cdot 0,9^2} = 3,2 \text{ м}/\text{с}.$$

Швидкість в циклоні не повинна відхилятися більш ніж на 15 % від оптимальної. Складаємо пропорцію:

$$v_{\text{опт}} = 3,5 \text{ м/с} - 100 \%$$

$$v = 3,2 \text{ м/с} - x \%$$

$$x = \frac{3,2 \cdot 100}{3,5} = 91,4 \%$$

$$\Delta = 100 \% - 91,4 \% = 8,6 \% < 15\%,$$

тоді розрахована швидкість газу не відхиляється від норми.

Розраховуємо коефіцієнт гідравлічного опору групи циклонів за табл.8,9,10,11, враховуючи, що запиленість газу $C_{\text{поч}} = 30 \text{ г/м}^3$ та приймаючи, що апарат працює в гідравлічній мережі без додаткових пристроїв; циклонні елементи розташовані в одній площині прямокутно з організованим підводом газу.

$$\xi_{\text{ц}} = 1,0 \cdot 0,915 \cdot 155 + 35 = 176,8.$$

Визначаємо втрати тиску в групі циклонів, якщо щільність газу $\rho_{\text{г}} = 1,38 \text{ кг/м}^3$:

$$\Delta P = 176,8 \cdot \frac{1,38 \cdot 3,2^2}{2} = 1249 \text{ Па.}$$

Приймаємо, що втрати тиску є прийнятними для вибраної технологічної схеми. Розраховуємо еквівалентний діаметр часток, що вловлюються в циклоні з ефективністю 50 % при робочих умовах, враховуючи динамічну в'язкість газу $\mu = 15,28 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$, густину часток $\rho = 2400 \text{ кг/м}^3$, дані з табл.3:

$$d_{\eta=50} = 4,50 \cdot \sqrt{\frac{0,9}{0,6}} \cdot \sqrt{\frac{1930}{2400}} \cdot \sqrt{\frac{15,28 \cdot 10^{-6}}{22,2 \cdot 10^{-6}}} \cdot \sqrt{\frac{3,5}{3,2}} = 4,50 \cdot 1,22 \cdot 0,90 \cdot 0,83 \cdot 1,05 = 4,3 \text{ мкм.}$$

Визначаємо параметр “х” функції розподілу $\Phi(x)$:

$$x = \frac{\lg \frac{15}{4,3}}{\sqrt{\lg^2 3,5 + \lg^2 0,352}} = 0,76.$$

За табл.12 $\Phi(x) = 0,5527$, тоді загальна ефективність пиловловлювання в циклоні:

$$\eta = 50 (1 + 0,5527) = 77,6 \, \%.$$

Визначаємо ступені очищення по фракціям:

d	5	10	15	25	50
x	0,09	0,52	0,76	1,08	1,50
$\Phi(x)$	0,0717	0,3969	0,5527	0,7199	0,8664
$\eta, \%$	53,6	69,9	77,6	86,0	93,3

Тоді загальна ефективність очищення газу від пилу по залежності від фракційного вмісту часток:

$$\eta = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^5 (53,6 \cdot 12 + 69,9 \cdot 18 + 77,6 \cdot 40 + 86,0 \cdot 22 + 93,3 \cdot 8) = 76,5 \, \%.$$

Виходячи з витрати газу, діаметра та кількості циклонів обираємо по табл.6 групу з шести циклонів ЦН-15-900х6УП; код ОКП 36 4652 4002; площа перерізу корпусів складає $3,81 \, \text{м}^2$; робочий об'єм бункеру для збору пилу – $5,55 \, \text{м}^3$; вага – 5810 кг.

4.5. Розрахунок електрофільтру

Електрофільтри серії УГ – уніфіковані горизонтальні для очищення газів з температурою до 250 °С. Технічні характеристики електрофільтрів наведені в табл.13. Електрофільтри першого габариту УГ1 мають висоту

Таблиця 13. – Технічні характеристики електрофільтрів серії УГ.

Марка	Активна висота електродів, м	Активна довжина поля, м	Загальна площа осадження, м ²	Габаритні розміри, м		
				Довжина	Ширина (по вісям опор)	Висота
УГ1-2-10	4,2	2,51	420	9,6	3,0	12,3
УГ1-3-10	4,2	2,51	630	14,1	3,0	12,3
УГ1-2-15	4,2	2,51	630	9,6	4,5	12,3
УГ1-3-15	4,2	2,51	940	14,1	4,5	12,3
УГ2-3-26	7,5	2,51	1690	14,1	4,5	15,4
УГ2-4-26	7,5	2,51	2250	18,6	4,5	15,4
УГ2-3-37	7,5	2,51	2360	14,1	6,0	15,4
УГ2-4-37	7,5	2,51	3150	18,6	6,0	15,4
УГ2-3-53	7,5	2,51	3370	14,1	9,0	15,4
УГ2-4-53	7,5	2,51	4500	18,6	9,0	15,4
УГ2-3-74	7,5	2,51	4700	14,1	12,0	15,4
УГ2-4-74	7,5	2,51	6300	18,6	12,0	15,4
УГ3-3-88	12,0	3,95	9200	18,8	9,0	21,8
УГ3-4-88	12,0	3,95	12300	24,8	9,0	21,8
УГ3-3-115	12,0	3,95	12100	18,8	12,0	21,8
УГ3-4-115	12,0	3,95	16100	24,8	12,0	21,8
УГ3-3-177	12,0	3,95	18400	18,8	18,0	21,8
УГ3-4-177	12,0	3,95	24600	24,8	18,0	21,8
УГ3-3-230	12,0	3,95	24200	18,8	24,0	21,8
УГ3-4-230	12,0	3,95	32200	24,8	24,0	21,8
УГ3-3-265	12,0	3,95	27600	18,8	27,0	21,8
УГ3-4-265	12,0	3,95	36900	24,8	27,0	21,8

електродів 4 тис. мм, другого габариту УГ2 – 7,5 тис. мм, третього габариту УГ3 – 12 тис. мм. Наступні цифри, що наведені на марці електрофільтру, вказують кількість полів фільтру та його активний переріз. Наприклад, марка УГ2-3-53 означає, що висота електродів – 7500 мм, апарат трьохпольний, активним перерізом 53 м². Електрофільтри першого та другого габаритів мають активну довжину полів 2,5 м, електрофільтри третього габариту – 4 м. Електрофільтри першого габариту випускають двох - та трьохпольними, а електрофільтри другого та третього габаритів – трьох - та чотирьохпольними (рис.6).

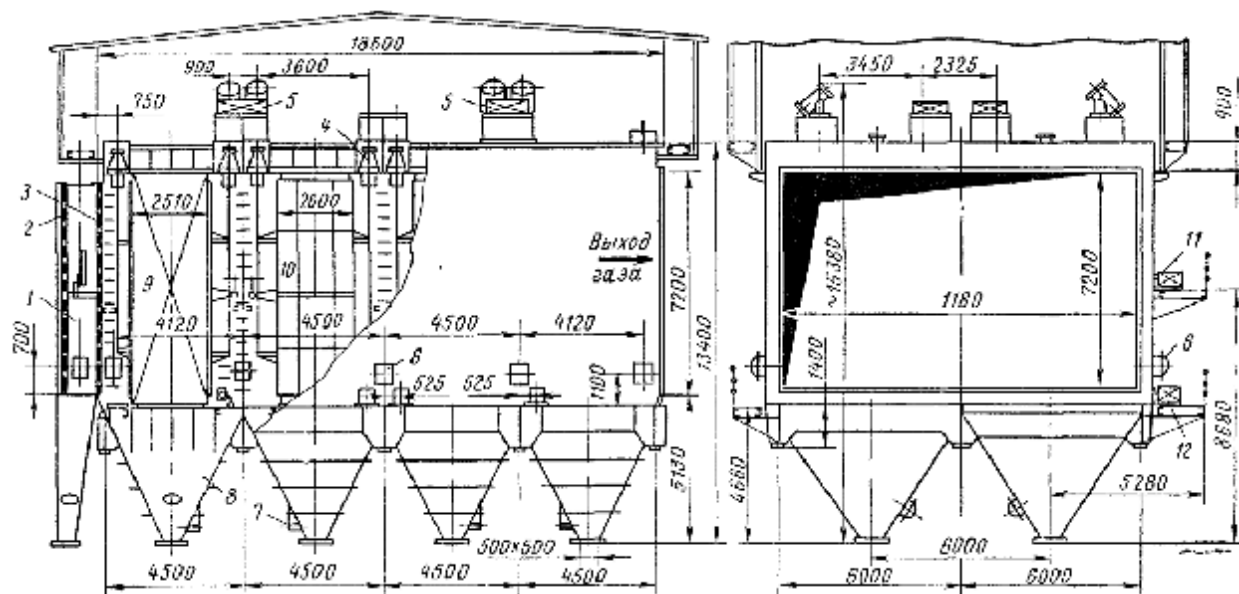


Рис.6. Схема чотирьохпольного електрофільтру серії УГ: 1 – форкамера; 2 – передня газорозподільна решітка; 3 – задня газорозподільна решітка; 4 – опорно-прохідний ізолятор; 5 – привід струшування коронуючих електродів; 6 – наглядний люк; 7 – вібратор бункера; 8 – бункер; 9 – осаджувальний електрод; 10 – коронуючий електрод; 11 – привід струшування газорозподільних решіток; 12 – привід струшування осаджувальних електродів.

Осаджувальні електроди в електрофільтрах УГ – з профільованих тонкостінних широкополосних (з шириною 350 мм) елементів відкритого

профілю з нижнім молотковим струшуванням. Крок між однойменними електродами - 275 мм.

Коронуючі електроди – рамної конструкції, з боковим підвісом на кварцових опорно-прохідних ізоляторах і молотковим струшуванням. Коронуючі електроди електрофільтрів УГЗ струшуються на двох рівнях. Елементи коронуючих електродів – голчаті, з сталльної стрічки з виштампуваними вістрями. Крок між коронуючими електродами, зібраними в раму, - 180 мм.

Відстань між осаджувальними та коронуючими електродами – 125 мм, що цілком відповідає найбільшому значенню лінійної щільності току корони, при якому відношення кроку між коронуючими електродами до відстані між різнойменними електродами дорівнює 1,2 – 1,6.

Корпуси електрофільтрів УГ розраховані на роботу під розрядженням 3-4 КПа та заповнення бункерів пилом з насипною вагою до 1500 кг/м³.

Електрофільтри типу ЕГА (рис.7) – одно - та двохсекційні апарати прямокутної форми, складаються з двох – чотирьох електричних полів, встановлених послідовно по ходу газу. Корпуси апаратів – сталльні, покриті зверху теплоізоляцією. Активна зона електрофільтрів складається з осаджувальних електродів (пласких полотен, зібраних з пластинчатих елементів спеціального профілю) та коронуючих електродів (трубчатих рам, в яких натягнуті стрічково-голчаті елементи). Відстань між сусідніми осаджувальними електродами (300 мм) є також шириною одиничного газового проходу.

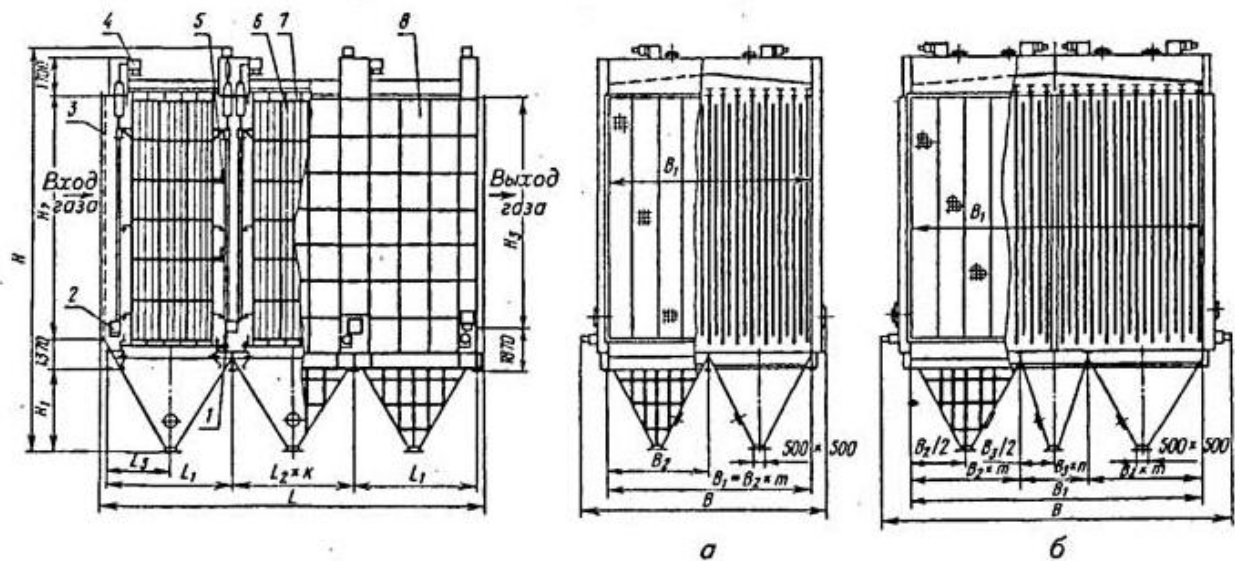


Рис.7. Электрофилтры типу ЕГА: а – односекційні; б – двухсекційні; 1 – механізм струшування осаджувальних електродів; 2 – люк обслуговування; 3 – газорозподільча решітка; 4 – захисна коробка для підведення току; 5 – механізм струшування коронуючих електродів; 6 – коронуючий електрод; 7 – осаджувальний електрод; 8 – корпус.

Видалення вловленого пилю з електродів – механічне, шляхом періодичного струшування ударами молотка. Використовуються для очищення газів з температурою до 330 °С та розрядженням до 15 КПа. Технічні характеристики електрофільтрів наведені в табл.14. Умовне позначення типорозміру електрофільтру означає: Е – електрофільтр; Г – горизонтальний; А – модифікація; числа після букв: перше – кількість секцій, друге – кількість газових проходів, третє – номінальна висота електродів (в м), четверте – кількість елементів в осаджувальному електроді, п'яте – кількість електричних полів по довжині електрофільтру.

Таблиця 14. - Технічні характеристики електрофільтрів серії ЕГА.

Марка	Активна довжина поля, м	Площа активного перерізу, м ²	Загальна площа осадження, м ²	Габаритні розміри, м		
				Довжина	Ширина (по вісям опор)	Висота
1	2	3	4	5	6	7
ЕГА1-10-6-4-2	2,56	16,5	630	9,26	3,2	12,4
ЕГА1-10-6-4-3	2,56	16,5	950	13,44	3,2	12,4
ЕГА1-10-6-6-2	3,84	16,5	950	11,82	3,2	13,4
ЕГА1-10-6-6-3	3,84	16,5	1430	17,28	3,2	13,4
ЕГА1-14-7,5-4-3	2,56	28,7	1660	13,44	4,4	13,9
ЕГА1-14-7,5-4-4	2,56	28,7	2210	17,62	4,4	13,9
ЕГА1-14-7,5-6-2	3,84	28,7	1660	11,82	4,4	14,9
ЕГА1-14-7,5-6-3	3,84	28,7	2480	17,28	4,4	14,9
ЕГА1-20-7,5-4-3	2,56	41,0	2360	13,44	6,2	15,4
ЕГА1-20-7,5-4-4	2,56	41,0	3160	17,62	6,2	15,4
ЕГА1-20-7,5-6-2	3,84	41,0	2360	11,82	6,2	15,4
ЕГА1-20-7,5-6-3	3,84	41,0	3550	17,28	6,2	15,4
ЕГА1-20-9-6-2	3,84	49,0	2830	11,82	6,2	16,9
ЕГА1-20-9-6-3	3,84	49,0	4240	17,28	6,2	16,9
ЕГА1-20-9-6-4	3,84	49,0	5660	22,74	6,2	16,9
ЕГА1-30-7,5-4-3	2,56	61,4	3550	13,44	9,2	14,9
ЕГА1-30-7,5-4-4	2,56	61,4	4730	17,62	9,2	14,9
ЕГА1-30-7,5-6-2	3,84	61,4	3550	11,82	9,2	14,9
ЕГА1-30-7,5-6-3	3,84	61,4	5320	17,28	9,2	14,9
ЕГА1-30-9-6-2	3,84	73,4	4240	11,82	9,2	16,4
ЕГА1-30-9-6-3	3,84	73,4	6360	17,28	9,2	16,4
ЕГА1-30-9-6-4	3,84	73,4	8480	22,74	9,2	16,4
ЕГА1-30-12-6-3	3,84	97,4	8440	17,28	9,2	19,4
ЕГА1-30-12-6-4	3,84	97,4	11250	22,74	9,2	19,4
ЕГА1-40-7,5-4-3	2,56	81,9	4730	13,44	12,2	15,4
ЕГА1-40-7,5-4-4	2,56	81,9	6310	17,62	12,2	15,4

Продовження табл.14.

1	2	3	4	5	6	7
ЕГА1-40-7,5-6-2	3,84	81,9	4730	11,82	12,2	15,4
ЕГА1-40-7,5-6-3	3,84	81,9	7100	17,28	12,2	15,4
ЕГА1-40-9-6-2	3,84	97,9	5650	11,82	12,2	16,9
ЕГА1-40-9-6-3	3,84	97,9	8480	17,28	12,2	16,9
ЕГА1-40-9-6-4	3,84	97,9	11310	22,74	12,2	16,9
ЕГА1-40-12-6-3	3,84	129,8	11250	17,28	12,2	19,9
ЕГА1-40-12-6-4	3,84	129,8	15000	22,74	12,2	19,9
ЕГА2-48-12-6-3	3,84	155,8	13500	17,28	15,2	19,9
ЕГА2-48-12-6-4	3,84	155,8	18000	22,74	15,2	19,9
ЕГА2-56-12-6-3	3,84	181,7	15750	17,28	17,6	19,9
ЕГА2-56-12-6-4	3,84	181,7	21000	22,74	17,6	19,9
ЕГА2-76-12-6-3	3,84	246,6	21400	17,28	23,6	19,9
ЕГА2-76-12-6-4	3,84	246,6	28500	22,74	23,6	19,9
ЕГА2-88-12-6-3	3,84	285,6	24750	17,28	27,2	19,9
ЕГА2-88-12-6-4	3,84	285,6	33000	22,74	27,2	19,9

Визначаємо щільність газу при умовах $t = 0^\circ \text{C}$, $P = 0,101 \text{ МПа}$ по формулі:

$$r_0 = 0,01(a_{\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2} + a_{\text{H}_2\text{O}} r_{\text{H}_2\text{O}} + a_{\text{O}_2} r_{\text{O}_2} + a_{\text{N}_2} r_{\text{N}_2} + a_{\text{CO}} r_{\text{CO}} + a_{\text{CH}_4} r_{\text{CH}_4} + a_{\text{H}_2} r_{\text{H}_2}) \text{ [кг/м}^3\text{]}, \quad (4.33)$$

де a – концентрація розчинених газів, %; ρ – щільність розчинених газів при умовах $t = 0^\circ \text{C}$, $P = 0,101 \text{ МПа}$, кг/м^3 (за табл.15).

Тоді щільність газу при робочих умовах:

$$r_z = r_0 \frac{273 \cdot (101,3 \cdot 10^3 - P_e)}{(273 + t_e) \cdot 101,3 \cdot 10^3} \text{ [кг/м}^3\text{]}, \quad (4.34)$$

де P_e – розрідження газу в електрофільтрі, Па; t_e – температура газу перед електрофільтром, $^\circ \text{C}$.

Таблиця 15. – Щільність деяких газів при тиску 101,3 кПа.

Гази	Щільність газів, кг/м ³	Температура, °С
1	2	3
Повітря	1,2928	20
Повітря	1,293	0
Доменний газ	1,121	20
Гази переробки вугілля: горизонтальна ретортна піч	0,48	20
Гази переробки вугілля: вертикальна ретортна піч безперервної дії без пропарювання	0,52	20
Гази переробки вугілля: вертикальна ретортна піч безперервної дії з пропарюванням	0,58	20
Генераторний газ на вугіллі	1,05	20
Генераторний газ на коксі	1,08	20
Водяний газ	0,82	0
Кисень	1,429	0
Азот	1,251	0
Диоксид вуглецю	1,977	0
Оксид вуглецю	1,250	0
Водень	0,08988	0
Метан	0,717	0
Етан	1,037	0
Пропан	2,020	0
Етилен	1,251	0
Сірководень	1,539	0
Диоксид сірки	2,927	0
Триоксид сірки	3,57	0

Продовження табл.15.

1	2	3
Аміак	0,771	0
Пари води	0,804	0
Пари води	0,598	100
Хлор	3,214	0
Хлористий водень	1,626	0
Фтор	1,693	0
Фтористий водень	0,922	0
Фтористий кремній	4,684	0

Витрата газу при робочих умовах:

$$V_z = \frac{V \cdot r_0}{3600 r_z} \text{ [м}^3\text{/с]}. \quad (4.35)$$

Необхідна площа поперечного перерізу активної зони електрофільтру при середній швидкості в апараті з горизонтальним рухом потоку запиленого газу в межах $u = 0,5 - 1$ м/с визначається по формулі:

$$F = \frac{V_z}{u} \text{ [м}^2\text{]}. \quad (4.36)$$

Підбираємо з табл.13,14 серійну конструкцію електрофільтру, виходячи з необхідної площі перерізу активної зони. Уточнюємо серійну площу перерізу активної зони F_ϕ .

Тоді фактична швидкість газу в активному полі апарату:

$$u_\phi = \frac{V_z}{F_\phi} \text{ [м/с]}. \quad (4.37)$$

Визначаємо відносну щільність газу β в порівнянні до стандартних умов ($t = 20^\circ\text{C}$, $P = 0,101\text{ МПа}$):

$$b = \frac{(273 + 20) \cdot (101,3 \cdot 10^3 - P_e)}{(273 + t_e) \cdot 101,3 \cdot 10^3}. \quad (4.38)$$

Критичну напруженість електричного поля, при якій виникає коронний розряд, розраховуємо по емпіричній формулі Піка:

$$E_{кр} = 3,04(b + 0,0311\sqrt{\frac{b}{R_1}}) \cdot 10^6 \text{ [В/м]}, \quad (4.39)$$

де R_1 – радіус коронуючого електроду ($R_1 = 0,001\text{--}0,002\text{ м}$).

Критична напруга корони для пластинчатого електрофільтру:

$$U_{кр} = E_{кр} R_1 \left(\frac{pH}{S} - 2,3 \lg \frac{2pR_1}{S} \right) \text{ [В]}, \quad (4.40)$$

де H – відстань між коронуючими та осаджувальними електродами, м; S – крок коронуючих електродів, м.

Лінійна щільність струму корони:

$$i_0 = \frac{4p^2 Ku}{9 \cdot 10^{10} \cdot S^2 \cdot \left(\frac{pH}{S} - 2,3 \lg \frac{2pR_1}{S} \right)} \cdot U \cdot (U - U_{кр}) \text{ [А/м]}, \quad (4.41)$$

де U – робоча напруга в електрофільтрі, В; K – рухливість іонів в газах, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (приймаємо $K = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ для сухого повітря); v – коефіцієнт, який залежить від H/S (для пластинчатого електрофільтру $v = 0,055$).

Напруженість електричного поля:

$$E = \sqrt{\frac{8i_0 H}{4pKvS}} \text{ [В/м]}, \quad (4.42)$$

де ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

В'язкість компонентів газу при робочих умовах в залежності від температури:

$$m = m_0 \frac{T_0 + C}{t_e + 273 + C} \cdot \left(\frac{t_e + 273}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} [\text{Па} \cdot \text{с}], \quad (4.43)$$

де C – постійна Сазерленда для визначення в'язкості в залежності від температури, К; T_0 – температура, використана для розрахунку постійної Сазерленда, К; μ_0 – в'язкість розчинених газів при $P = 0,101$ МПа, Па·с (за табл.16).

Таблиця 16. – Параметри розрахунку в'язкості газів ($0 < T < 555$ К, $P < 3,45$ МПа).

Газ	C, К	T_0 , К	μ_0 , Па·с
N ₂	111	300,55	$17,81 \cdot 10^{-6}$
NH ₃	370	293,15	$9,82 \cdot 10^{-6}$
H ₂	72	293,85	$8,76 \cdot 10^{-6}$
повітря	120	291,15	$18,27 \cdot 10^{-6}$
CO ₂	240	293,15	$14,8 \cdot 10^{-6}$
O ₂	127	292,25	$20,18 \cdot 10^{-6}$
CO	118	288,15	$17,2 \cdot 10^{-6}$
SO ₂	416	293,65	$12,54 \cdot 10^{-6}$

В'язкість парів води в залежності від температури визначаємо за табл.17.

В'язкість метану CH₄ при 300 К складає $11,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с, при 400 К – $14,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Таблиця 17. - В'язкість парів води H₂O в залежності від температури.

t, °C	μ, Па·с	t, °C	μ, Па·с	t, °C	μ, Па·с
0	8,238·10 ⁻⁶	130	13,24·10 ⁻⁶	260	18,83·10 ⁻⁶
10	8,532·10 ⁻⁶	140	13,53·10 ⁻⁶	270	19,32·10 ⁻⁶
20	8,924·10 ⁻⁶	150	13,93·10 ⁻⁶	280	19,91·10 ⁻⁶
30	9,316·10 ⁻⁶	160	14,32·10 ⁻⁶	290	20,59·10 ⁻⁶
40	9,709·10 ⁻⁶	170	14,71·10 ⁻⁶	300	21,28·10 ⁻⁶
50	10,00·10 ⁻⁶	180	15,10·10 ⁻⁶	310	21,97·10 ⁻⁶
60	10,40·10 ⁻⁶	190	15,59·10 ⁻⁶	320	22,85·10 ⁻⁶
70	10,59·10 ⁻⁶	200	15,99·10 ⁻⁶	330	23,93·10 ⁻⁶
80	11,18·10 ⁻⁶	210	16,38·10 ⁻⁶	340	25,20·10 ⁻⁶
90	11,57·10 ⁻⁶	220	16,87·10 ⁻⁶	350	26,58·10 ⁻⁶
100	11,96·10 ⁻⁶	230	17,36·10 ⁻⁶	360	29,13·10 ⁻⁶
110	12,45·10 ⁻⁶	240	17,75·10 ⁻⁶	370	33,71·10 ⁻⁶
120	12,85·10 ⁻⁶	250	18,24·10 ⁻⁶		

В'язкість хлору в залежності від температури визначаємо за табл.18.

Таблиця 18.- В'язкість хлору Cl₂ в залежності від температури.

t, °C	μ, Па·с	t, °C	μ, Па·с	t, °C	μ, Па·с	t, °C	μ, Па·с
0	12,30·10 ⁻⁶	30	13,79·10 ⁻⁶	60	15,13·10 ⁻⁶	90	16,39·10 ⁻⁶
10	12,82·10 ⁻⁶	40	14,25·10 ⁻⁶	70	15,56·10 ⁻⁶	100	16,80·10 ⁻⁶
20	13,30·10 ⁻⁶	50	14,70·10 ⁻⁶	80	15,98·10 ⁻⁶		

Визначаємо в'язкість суміші компонентів газу при робочих умовах:

$$m_z = 0,01(a_{CO_2} m_{CO_2} + a_{H_2O} m_{H_2O} + a_{O_2} m_{O_2} + a_{N_2} m_{N_2} + a_{CO} m_{CO} + a_{CH_4} m_{CH_4} + a_{H_2} m_{H_2}) \text{ [Па·с]}, \quad (4.44)$$

де а – концентрація розчинених газів, %.

Знаходимо питому поверхню осадження по формулі:

$$f = \frac{F_e}{V_z} [\text{м}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^3], \quad (4.45)$$

де F_e - загальна площа осадження електродів, м^2 (табл.13,14).

Швидкість дрейфу часток з діаметром $d_{\text{ч}} = 2\text{-}50$ мкм розраховується по наступному рівнянню:

$$w = \frac{0,059 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 d_{\text{ч}}}{m_z} [\text{м} / \text{с}]. \quad (4.46)$$

Фракційний коефіцієнт очищення:

$$h_i = 1 - e^{-fw} [\%]. \quad (4.47)$$

Загальний коефіцієнт очищення газу від пилу в електрофільтрі:

$$\eta = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n h_i \Phi_i [\%]. \quad (4.48)$$

Розглянемо на прикладі:

Вхідні параметри:

витрата газу $V = 43160 \text{ м}^3/\text{год}$;

температура газу на вході в електрофільтр $t_e = 180 \text{ }^\circ\text{C}$;

розрідження газу в електрофільтрі $P_e = 2000 \text{ Па}$;

склад газу $\text{C}_{\text{N}_2} = 61,4 \%$, $\text{C}_{\text{O}_2} = 0,40 \%$, $\text{C}_{\text{CO}_2} = 25,6 \%$, $\text{C}_{\text{H}_2\text{O}} = 12,6 \%$;

робоча максимальна напруга $U = 80 \cdot 10^3 \text{ В}$;

склад пилу в газі перед електрофільтром:

Д _{часток} , мкм	1	2	5	15	25
Фракційний вміст часток Φ _i , %	3	14	55	25	3

Визначаємо щільність газу при умовах $t = 0^\circ \text{C}$, $P = 0,101 \text{ МПа}$:

$$r_0 = 0,01(a_{\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2} + a_{\text{H}_2\text{O}} r_{\text{H}_2\text{O}} + a_{\text{O}_2} r_{\text{O}_2} + a_{\text{N}_2} r_{\text{N}_2}) = \\ 0,01(25,6 \cdot 1,977 + 12,6 \cdot 0,804 + 0,40 \cdot 1,429 + 61,4 \cdot 1,251) = 1,38 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

Тоді щільність газу при робочих умовах:

$$r_z = 1,38 \frac{273 \cdot (101,3 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^3)}{(273 + 180) \cdot 101,3 \cdot 10^3} = 0,815 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

Витрата газу при робочих умовах:

$$V_z = \frac{43160 \cdot 1,38}{3600 \cdot 0,815} = 20,3 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Приймаємо $v = 1 \text{ м} / \text{с}$, тоді необхідна площа поперечного перерізу активної зони електрофільтру:

$$F = \frac{20,3}{1} = 20,3 \text{ м}^2.$$

Вибираємо з табл.13 трьохпольний електрофільтр УГ2-3-26, що має площу поперечного перерізу $F_\phi = 26 \text{ м}^2$, загальну площу осадження електродів $F_e = 1690 \text{ м}^2$ при величині кроку між ними $L = 275 \text{ мм}$, активній висоті електродів $7,5 \text{ м}$ та активній довжині поля $2,51 \text{ м}$, відстань між коронуючими електродами $S = 180 \text{ мм}$, відстань між коронуючими та осаджувальними електродами $H = 125 \text{ мм}$.

Тоді фактична швидкість газу в активному полі апарату:

$$u_\phi = \frac{20,3}{26} = 0,78 \text{ м} / \text{с}.$$

Визначаємо відносну щільність газу β при стандартних умовах ($t = 20^\circ \text{C}$, $P = 0,101 \text{ МПа}$):

$$b = \frac{(273+20) \cdot (101,3 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^3)}{(273+180) \cdot 101,3 \cdot 10^3} = 0,64.$$

Тоді критична напруженість електричного поля, при якій виникає коронний розряд:

$$E_{кр} = 3,04(0,64 + 0,0311 \sqrt{\frac{0,64}{0,001}}) \cdot 10^6 = 4,34 \cdot 10^6 \text{ В/м}$$

Критична напруга корони для пластинчатого електрофільтру:

$$U_{кр} = 4,34 \cdot 10^6 \cdot 0,001 \left(\frac{3,14 \cdot 0,125}{0,18} - 2,3 \lg \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,001}{0,18} \right) = 24 \cdot 10^3 \text{ В.}$$

Лінійна щільність струму корони:

$$i_0 = \frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,055}{9 \cdot 10^{10} \cdot 0,18^2 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 0,125}{0,18} - 2,3 \lg \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,001}{0,18} \right)} \cdot 80 \cdot 10^3 \cdot (80 \cdot 10^3 - 24 \cdot 10^3) = 0,12 \cdot 10^{-3} \text{ А/м.}$$

Напруженість електричного поля:

$$E = \sqrt{\frac{8 \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,125}{4 \cdot 3,14 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,18}} = 1,69 \cdot 10^5 \text{ В/м.}$$

В'язкість компонентів газу при робочих умовах в залежності від температури визначаємо, виходячи з табл.15,16:

$$m_{CO_2} = 14,8 \cdot 10^{-6} \frac{293,15 + 240}{180 + 273 + 240} \cdot \left(\frac{180 + 273}{293,15} \right)^{\frac{3}{2}} = 21,9 \cdot 10^{-6} \text{ Па·с;}$$

$$m_{O_2} = 20,18 \cdot 10^{-6} \frac{292,25 + 127}{180 + 273 + 127} \cdot \left(\frac{180 + 273}{292,25} \right)^{\frac{3}{2}} = 28,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па·с;}$$

$$m_{N_2} = 17,81 \cdot 10^{-6} \frac{300,55 + 111}{180 + 273 + 111} \cdot \left(\frac{180 + 273}{300,55} \right)^{\frac{3}{2}} = 23,9 \cdot 10^{-6} \text{ Па·с;}$$

$$m_{H_2O} = 15,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Визначаємо в'язкість суміші компонентів газу при робочих умовах:

$$m_z = 0,01 \cdot 10^{-6} (25,6 \cdot 21,9 + 12,6 \cdot 15,1 + 0,4 \cdot 28,2 + 61,4 \cdot 23,9) = 22,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Знаходимо питому поверхню осадження:

$$f = \frac{1690}{20,3} = 83,25 \text{ м}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^3.$$

Швидкість дрейфу часток:

$$w = \frac{0,059 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 d_q}{m_z} = \frac{0,059 \cdot 10^{-10} \cdot (1,69 \cdot 10^5)^2 \cdot d_q}{22,3 \cdot 10^{-6}} = 0,76 \cdot 10^4 d_q.$$

Для часток з заданим діаметром:

$$w_1 = 0,76 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,76 \cdot 10^{-2} \text{ м/с};$$

$$w_2 = 0,76 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 1,52 \cdot 10^{-2} \text{ м/с};$$

$$w_5 = 0,76 \cdot 10^4 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 3,8 \cdot 10^{-2} \text{ м/с};$$

$$w_{15} = 0,76 \cdot 10^4 \cdot 15 \cdot 10^{-6} = 11,4 \cdot 10^{-2} \text{ м/с};$$

$$w_{25} = 0,76 \cdot 10^4 \cdot 25 \cdot 10^{-6} = 19,0 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}.$$

Фракційний коефіцієнт очищення:

$$h_1 = (1 - e^{-83,25 \cdot 0,76 \cdot 10^{-2}}) \cdot 100 = (1 - 0,53) \cdot 100 = 47 \%;$$

$$h_2 = (1 - e^{-83,25 \cdot 1,52 \cdot 10^{-2}}) \cdot 100 = (1 - 0,28) \cdot 100 = 72 \%;$$

$$h_5 = (1 - e^{-83,25 \cdot 3,8 \cdot 10^{-2}}) \cdot 100 = (1 - 0,042) \cdot 100 = 95,8 \%;$$

$$h_{15} = (1 - e^{-83,25 \cdot 11,4 \cdot 10^{-2}}) \cdot 100 = (1 - 0,00008) \cdot 100 = 99,992 \%;$$

$$h_{25} = (1 - e^{-83,25 \cdot 19,0 \cdot 10^{-2}}) \cdot 100 = 100 \%.$$

Загальний коефіцієнт очищення газу від пилу в електрофільтрі:

$$\eta = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n 47 \cdot 3 + 72 \cdot 14 + 95,8 \cdot 55 + 99,992 \cdot 25 + 100 \cdot 3 = 92,2 \%.$$

4.6. Розрахунок відцентрового скрубера

Відцентровий скрубер ЦС-ВТІ (рис.8) – вертикальний стальний циліндр з товщиною стінки 5-6 мм, має конічне дно і тангенційно розташований вхідний патрубок. Технічні характеристики скрубера наведені в табл.19. Щоб запобігти швидкому

Таблиця 19. – Основні технічні показники нормалізованих відцентрових скруберів ЦС-ВТІ.

Зовнішній діаметр D, м	Висота Н, м	Максимальна пропускна здатність $V_{\max}$, м ³ /с	Витрата води на зрошення $M_{\text{в}}$, кг/с	Коефіцієнт опору ξ	Зовнішній діаметр D, м	Висота Н, м	Максимальна пропускна здатність $V_{\max}$, м ³ /с	Витрата води на зрошення $M_{\text{в}}$, кг/с	Коефіцієнт опору ξ
0,60	3,83	1,10	0,20	46,5	1,20	6,71	5,30	0,53	35,8
0,70	4,31	1,60	0,25	42,8	1,30	7,16	6,30	0,58	35,2
0,80	4,79	2,15	0,30	40,3	1,40	7,67	7,40	0,65	34,7
0,90	5,27	2,85	0,36	38,6	1,50	8,15	8,60	0,74	34,1
1,00	5,75	3,55	0,42	37,3	1,60	8,63	9,85	0,82	33,8
1,10	6,23	4,40	0,47	36,6	1,70	9,11	11,20	0,90	33,5

зношуванню внаслідок корозії та абразивної дії пилу, скрубер всередині футерується керамічною плиткою. Вода підводиться всередину через спеціальні сопла, розташовані на відстані 500 мм один від одного, над якими розміщений бризковловлюючий козирок. Витрата води розраховується за емпіричною формулою:

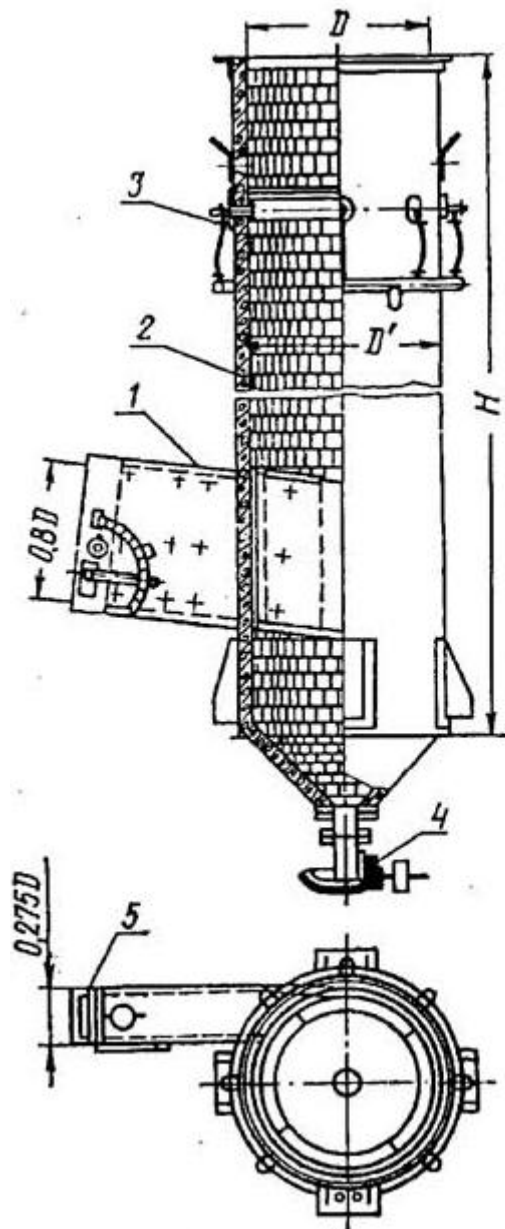
$$M_{\text{ж}} = 0,14\pi D \text{ [кг/с]}, \quad (4.49)$$

де D – діаметр скрубера, м.

Швидкість газу у вхідному патрубку, що забезпечує підвід часток пилу до плівки, приймається 15-25 м/с. З підвищенням діаметра скрубера ефективність вловлювання знижується, тому всі розрахунки ведуться на діаметр скрубера 1 м з наступним перерахунком.

При збільшенні висоти скрубера H ефективність вловлювання підвищується, проте після $H = (3-4)D$ вона практично залишається постійною, тому звичайно приймають $H = 4D$.

Ефективність вловлювання часток в відцентровому скрубєрі діаметром 1 м в залежності від їх розмірів та щільності приймаємо за табл.20.



Відцентровий скрубєр ЦС-ВТІ може застосовуватись як для видалення пилу, так і для поглинання розчинених газів, наприклад, SO_2 та SO_3 . Також їх часто використовують як краплєвловлювачі після скрубєрів Вєнтурі, в цьому випадку вони працюють без подачі води на зрошення.

Рис.8. Відцентровий скрубєр ЦС-ВТІ.

Таблиця 20. – Фракційні коефіцієнти очищення відцентрових скрубєрів ЦС-ВТІ діаметром 1 м*.

Швидкість газів у вхідному патрубку, м/с	Швидкість витання часток, см/с						
	0-0,5	0,5-2	2-5	5-10	10-15	15-20	> 20
15,0	65,5	80,0	88,0	81,0	92,7	94,0	98,0
17,0	75,7	85,2	90,0	92,0	93,7	95,0	98,5
19,0	81,4	88,2	91,5	93,2	94,5	95,8	99,0
21,0	85,0	90,3	92,8	94,3	95,5	96,7	99,5
23,0	87,4	91,6	93,7	95,3	96,4	97,6	100,0
23,5	87,7	91,8	94,0	95,5	96,6	97,8	100,0

*Співвідношення перерізу скрубєра и вхідного патрубка дорівнює 3,9.

Кількість скрубєрів n вибираємо, виходячи з витрати газу, з врахуванням можливості їх розміщення та ремонту.

Щільність газу при робочих умовах:

$$r_z = r_0 \frac{273 \cdot (101,3 \cdot 10^3 + P_c)}{(273 + t_c) \cdot 101,3 \cdot 10^3} \text{ [кг/м}^3\text{]}, \quad (4.50)$$

де r_0 – щільність газів при нормальних умовах, кг/м³; t_c - температура газу на вході в скрубєр, °С; P_c – збитковий тиск газів в скрубєрі, Па.

Тоді витрата газів при робочих умовах в кожному скрубєрі:

$$V_z = V_0 \frac{r_0}{n \cdot r_z} \text{ [м}^3\text{/с]}, \quad (4.51)$$

де V_0 - витрата газу, м³/с.

За витратою газу в скрубєрі приймаємо за табл.19 необхідний діаметр та висоту нормалізованого скрубєра.

Виходячи з того, що швидкість газу у вхідному патрубку нормалізованого скрубєра дорівнює 3,9 швидкості газу в скрубєрі, тоді швидкість газу у вхідному патрубку дорівнює:

$$w_{ex} = 3,9 \frac{V_z}{0,785D^2} \text{ [м/с]}. \quad (4.52)$$

Знаходимо коефіцієнт очищення скрубера діаметром 1 м при визначеній швидкості газу у вхідному патрубку за формулою:

$$h_1 = \sum \frac{h_i \cdot \Phi_i}{100} \text{ [%]}, \quad (4.53)$$

де η_i - фракційний коефіцієнт очищення (знаходимо з табл.20), %; Φ_i – фракційний вміст часток, %.

Коефіцієнт очищення в скрубєрі необхідного діаметра:

$$h = 100 - (100 - h_1) \cdot \sqrt{D} \text{ [%]}. \quad (4.54)$$

Гідравлічний опір скрубера знаходимо, виходячи з попередньої умови, що швидкість газу у вхідному патрубку нормалізованого скрубера дорівнює 3,9 швидкості газу в скрубєрі:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{r_z \cdot w_c^2}{2} = \xi \cdot \frac{r_z \cdot w_{ex}^2}{2 \cdot 3,9^2} \text{ [Па]}, \quad (4.55)$$

де ξ – коефіцієнт опору (знаходимо з табл.19).

По табл.19 знаходимо також витрату води M_v на зрошення скрубера потрібного діаметра.

Кількість пилу, що вловиться п скрубєрами, знаходимо по формулі:

$$M_n = \frac{V_z \cdot n \cdot C_n \cdot h}{100} \cdot 3600 \cdot 10^{-6} \text{ [т/год]}. \quad (4.56)$$

Розглянемо на прикладі 1:

Вхідні параметри:

витрата газу $V_0 = 49,0 \text{ м}^3/\text{с}$;

температура газу на вході в скрубєр $t_c = 160 \text{ }^\circ\text{C}$;

температура води на зрошування $t_v = 16 \text{ }^\circ\text{C}$;

щільність газу $\rho_0 = 1,32 \text{ кг/м}^3$;

концентрація пилу $C_n = 27,6 \text{ г/м}^3$;

склад пилу в газі перед скруббером:

Швидкість витання, см/с	0-0,5	0,5-2	2-5	5-10	10-15	15-20	>20
Фракційний вміст часток $\Phi_i, \%$	20	20	18,5	13,5	7,5	6,0	14,5

Вибираємо $n=10$ працюючих скрубберів, розрахованих на витрату $4,9 \text{ м}^3/\text{с}$ кожен, та 2 резервних скрубера, всього 12 скрубберів.

Щільність газу при робочих умовах:

$$r_z = 1,32 \cdot \frac{273}{273+160} = 0,83 \text{ кг/м}^3.$$

Тоді витрата газів в кожному скруббері:

$$V_z = 49 \cdot \frac{1,32}{10 \cdot 0,83} = 7,8 \text{ м}^3/\text{с}.$$

За витратою газу в скруббері приймаємо за табл.19 його діаметр $D=1,5 \text{ м}$ та висоту $H=8,15 \text{ м}$.

Швидкість газу у вхідному патрубку:

$$w_{\text{вх}} = 3,9 \frac{7,8}{0,785 \cdot 1,5^2} = 17,2 \text{ м/с}.$$

Коефіцієнт очищення скрубера діаметром 1 м при швидкості газу $17,2 \text{ м/с}$:

$$h_1 = (76,3 \cdot 20 + 85,5 \cdot 20 + 90,2 \cdot 18,5 + 92,1 \cdot 13,5 + 93,8 \cdot 7,5 + 95,1 \cdot 6,0 + 98,6 \cdot 14,5) / 100 = 88,5\%$$

.

Коефіцієнт очищення в скруббері діаметром 1,5 м:

$$h = 100 - (100 - 88,5) \sqrt{1,5} = 85,9\%.$$

Гідравлічний опір скрубера:

$$\Delta P = 34,1 \cdot \frac{0,83 \cdot 17,2^2}{2 \cdot 3,9^2} = 275,3 \text{ Па}.$$

Витрата води M_v з температурою $t_v = 16^\circ\text{C}$ на зрошення скрубера діаметром 1,5 м складає 0,74 кг/с.

Кількість пилю, що вловиться п скруберами, знаходимо по формулі:

$$M_n = \frac{7,8 \cdot 10 \cdot 27,6 \cdot 85,9}{100} \cdot 3600 \cdot 10^{-6} = 6,66 \text{ т/год.}$$

Розглянемо на прикладі 2:

Вхідні параметри:

витрата газу $V_0 = 130$ тис. $\text{м}^3/\text{год}$;

температура газу на вході в скрубєр $t_c = 110^\circ\text{C}$;

збитковий тиск газів в скрубєрі $P_c = 15$ Па;

концентрація хлору $\text{CCl}_2 = 10$ г/ м^3 ;

концентрація хлористого водню $\text{CHCl} = 15$ г/ м^3 ;

щільність газу $\rho_0 = 1,32$ кг/ м^3 ;

концентрація активного СаО в зрошувальній рідині на початку процесу $C_{\text{поч}} = 130$ кг/ м^3 ;

концентрація активного СаО в зрошувальній рідині в кінці процесу $C_{\text{кін}} = 20$ кг/ м^3 .

Щільність газу при робочих умовах:

$$r_z = 1,32 \cdot \frac{273 \cdot (101,3 \cdot 10^3 + 15)}{(273 + 110) \cdot 101,3 \cdot 10^3} = 0,94 \text{ кг/м}^3.$$

Тоді витрата газу при робочих умовах:

$$V = 130000 \cdot \frac{1,32}{0,94 \cdot 3600} = 50,7 \text{ м}^3/\text{с} = 182553 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Вибираємо $n=12$ скрубєрів (шість ниток споруд по два послідовно з'єднаних скрубєра у кожній нитці для більш повного уловлювання домішок); одна пара скрубєрів – у резерві, на випадок ремонту працюючих скрубєрів; всього 14 скрубєрів.

Витрата газу при робочих умовах для однієї пари скрубєрів складає:

$$V_z = \frac{50,7}{6} = 8,45 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для нормалізованого скрубера ЦС-ВТІ знаходимо з табл.19: $D = 1,5 \text{ м}$; $H = 8,15 \text{ м}$; $M_b = 0,74 \text{ кг/с}$; коефіцієнт опору скрубера $\xi = 34,1$.

Швидкість газу у вхідному патрубку нормалізованого скрубера дорівнює 3,9 швидкості газу в скрубєрі:

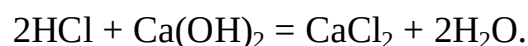
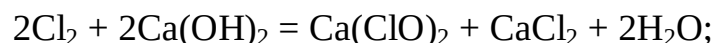
$$w_{ax} = 3,9 \cdot \frac{8,45}{0,785 \cdot 1,5^2} = 18,7 \text{ м/с}.$$

Гідравлічний опір скрубєра:

$$\Delta P = 34,1 \cdot \frac{0,94 \cdot 18,7^2}{2 \cdot 3,9^2} = 369 \text{ Па}.$$

Розрахунок витрати зрошувальної рідини:

сорбент $\text{Ca}(\text{OH})_2$ витрачається в процесі очищення на поглинання хлору та хлористого водню по реакціям:



Враховуючи, що концентрація хлору $C_{\text{Cl}_2} = 10 \text{ г/м}^3 = 10 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$, витрата газу при робочих умовах складає $182553 \text{ м}^3/\text{год}$, складаємо пропорцію:

$$2 \cdot 71 \text{ кг Cl}_2 - 2 \cdot 74 \text{ кг Ca}(\text{OH})_2;$$

$$10 \cdot 10^{-3} \cdot 182553 \text{ Cl}_2 - x_1 \text{ Ca}(\text{OH})_2;$$

$$x_1 = \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 182553 \cdot 2 \cdot 74}{2 \cdot 71} = 1903 \text{ кг/год}.$$

Враховуючи, що концентрація хлористого водню $C_{\text{HCl}} = 15 \text{ г/м}^3 = 15 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$, складаємо пропорцію:

$$2 \cdot 36,5 \text{ кг HCl} - 74 \text{ кг Ca(OH)}_2;$$

$$15 \cdot 10^{-3} \cdot 182553 \text{ HCl} - x_2 \text{ Ca(OH)}_2;$$

$$x_2 = \frac{15 \cdot 10^{-3} \cdot 182553 \cdot 74}{2 \cdot 36,5} = 2776 \text{ кг/год};$$

$$x_1 + x_2 = 1903 + 2776 = 4679 \text{ кг/год.}$$

З урахуванням того, що в реакціях приймає участь частина активного СаО з вапнякового молока концентрацією $(130-20) \text{ кг/м}^3$, то істинна витрата реагенту становитиме:

$$M_{\text{СаО}} = 4679 \cdot (130/110) = 5530 \text{ кг/год,}$$

або $V_{\text{СаО}} = 4679/110 = 5530/130 = 42,5 \text{ м}^3/\text{год}$ вапнякового молока, яке містить Ca(OH)_2 з концентрацією 130 кг/м^3 .

4.7. Розрахунок скрубера Вентурі

Скрубери Вентурі - найбільш ефективні з апаратів мокрого очищення газів від забруднюючих речовин. В скруберах Вентурі з центральним (форсуночним) зрошенням подача зрошувальної рідини відбувається за допомогою форсунок, що встановлені перед конфузоровою або безпосередньо в ній. Тиск перед форсунками звичайно складає 0,2-0,3 МПа.

Оптимальна конфігурація труби Вентурі (рис.9) забезпечується при таких співвідношеннях розмірів її елементів, як представлено в табл.21.

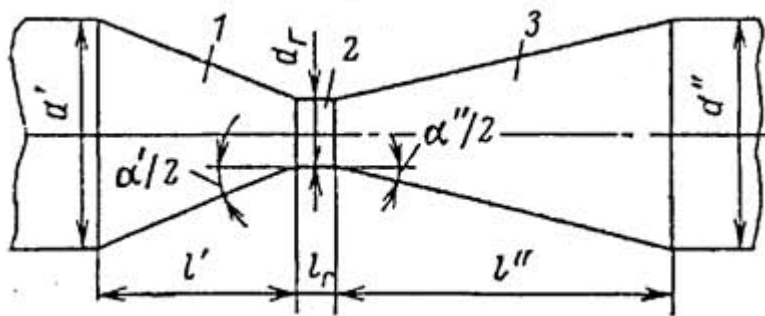


Рис.9. Нормалізована труба Вентурі: 1- конфузор; 2 – горловина; 3 – дифузор.

Таблиця 21. – Параметри розрахунку труби Вентурі.

Елементи труби Вентурі	Показники	Розрахунок
Конфузор	діаметр вхідного перерізу, м	d'
	кут звуження, °	$\alpha' = 25-28$
	довжина	$l' = (d' - d_r) / 2 \cdot \operatorname{tg} \alpha' / 2$
Горловина	діаметр, м	d_r
	довжина, м	$l_r = 0,15 d_r$
Дифузор	діаметр вихідного перерізу, м	d''
	кут розкриття, °	$\alpha'' = 6-7$
	довжина, м	$l'' = (d'' - d_r) / 2 \cdot \operatorname{tg} \alpha'' / 2$

Труба-розпилювач та краплевлловлювач можуть компонуватись окремо або в єдиному корпусі (рис.10 та рис.11).

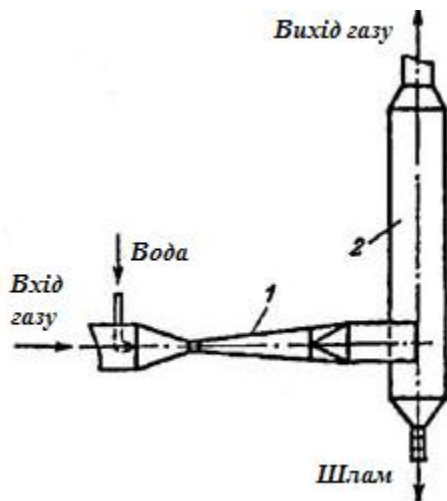


Рис.10. Скрубер Вентурі з виносним краплевлловлювачем: 1- труба-розпилювач; 2 – краплевлловлювач.

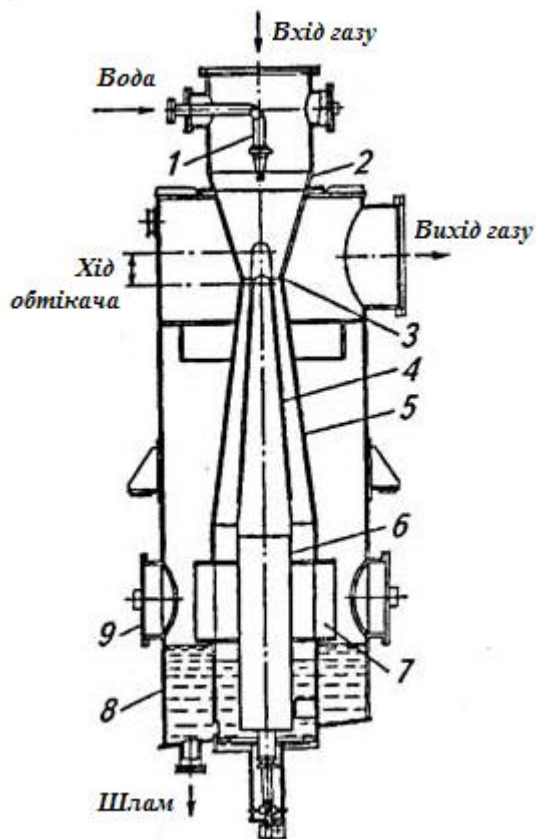


Рис.11. Скрубер Вентурі з кільцевим перерізом горловини, що регулюється: 1- форсунка; 2 – конфузор; 3 – горловина; 4 - регулюючий конус; 5 – дифузор; 6 – направляючий шток; 7 – відцентровий завихрювач; 8 – корпус краплевлловлювача; 9 – люк.

Високонапірні труби Вентурі (табл.22) використовуються з температурою до 400 °С та концентрацією пилу до 30 г/м³; допустимий вміст зависі у зворотній воді – 0,5 г/м³.

Уніфікований ряд скрубєрів Вентурі з кільцевим перерізом горловини (табл.23) має такі ж технічні вимоги по концентрації пилу та вмісту зависі у зрошувальній рідині, як і високонапірні труби Вентурі. Їх доцільно застосовувати при очищенні великих об'ємів газів, при цьому самі труби

Таблиця 22. – Технічні показники типорозмірного ряду високонапірних труб Вентурі оптимальної конфігурації.

Марка	Продуктивність, м ³ /год	Діаметр горловини, мм	Витрата зрошувальної рідини, м ³ /год	Тиск рідини перед форсунками, кПа	Габаритні розміри, мм	Маса, кг, не більше
1	2	3	4	5	6	7
ГВПВ-0,010- 400	3100-6500	115	2,16-5,00	80-410	540×610×2500	117,0
			5,00-12,60	63-400	540×685×2500	120,0
ГВПВ-0,014- 400	4140-8400	135	2,90-5,00	80-410	575×700×2940	148,0
			5,00-7,00	60-700	575×740×2940	150,0
ГВПВ-0,019- 400	5590-11340	155	3,90-12,80	80-980	645×785×3140	174,0
			13,00-22,70	420-710	645×795×3140	175,0
ГВПВ-0,025- 400	7490-15120	180	5,20-13,00	150-980	775×925×3790	244,0
			13,00-30,00	80-450	775×985×3790	257,0
ГВПВ-0,030- 400	9320-18900	200	6,50-13,00	60-250	790×1325×4025	305,0
			13,00-38,00	100-910	790×1355×4025	310,0
ГВПВ-0,045- 400	13800-28000	240	9,75-30,00	60-570	880×1420×4620	400,0
			30,00-56,00	110-390		420,0

Продовження табл.22.

1	2	3	4	5	6	7
ГВПВ-0,060-400	18630-37800	280	13,00-30,00 30,00-75,60	100-570 100-710	1075×1630×5420	535,0 560,0
ГВПВ-0,080-400	23460-47600	320	16,80-45,00 45,00-95,20	75-570 100-500	1545×1480×5940	645,0 675,0
ГВПВ-0,100-400	32430-65800	370	22,60-45,00 45,00-131,60	80-320 63-540	1835×1835×7240 1860×1860×7240	935,0 975,0
ГВПВ-0,140-400	41400-84000	420	28,80-45,00 45,00-168,00	130-320 63-880	2015×2015×8140 2060×2060×8140	1160,0 1200,0

Таблиця 23. – Технічна характеристика скрубєрів Вентурі з кільцевою горловиною.

Показники	CB150/90-800	CB210/120-1200	CB300/180-1600	CB400/250-2200	CB900/820-1600	CB1020/920-2000	CB1150/1020-2400	CB1380/1220-2000	CB1620/1420-2400	CB1860/1620-2800
Продуктивність, м ³ /год: максимальна	7	15	30	50	80	120	180	240	340	500
мінімальна	2	7	15	30	50	80	120	160	240	340
Висота скрубєра Н, мм	4095	4980	6205	7400	9160	11060	13165	11060	13165	14880
Розміри труби-розпилювача, мм: діаметр горловини	150	210	300	400	900	1020	1150	1380	1620	1860
діаметр обтікача	90	120	180	250	820	920	1020	1220	1420	1620
хід обтікача	250	250	350	350	150	185	212	245	350	400
Число краплєвловлювачів, шт.	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Діаметр краплєвловлювачів, мм	800	1200	1600	2200	1600	2000	2400	2000	2400	2800
Швидкість газів в вільному перерізі краплєвловлювача, м/с: максимальна	5,0	5,0	5,0	5,0	11,0	10,6	11,0	10,6	10,4	11,3
мінімальна	1,4	2,3	2,5	3,0	6,9	7,1	7,4	7,1	7,4	7,7
Маса, т	1,14	1,90	3,70	6,63	8,06	10,73	14,17	19,96	27,00	34,47

Вентурі мають центральний або плівковий спосіб підводу води на зрошення газів.

Необхідна ефективність роботи апарату визначається за формулою:

$$h = 1 - \frac{C_{вих}}{C_{вх}}, \quad (4.57)$$

де $C_{вх}$, $C_{вих}$ – вхідна та вихідна концентрації забруднювача, г/м³.

Розраховуємо число одиниць переносу:

$$N_q = \ln \frac{1}{1-h}. \quad (4.58)$$

Питому енергію K_q , що витрачається на пилогазовлювання, знаходимо з рівняння:

$$N_q = BK_q^c, \quad (4.59)$$

де B , χ – коефіцієнти, що характерні для кожного пилу або туману (визначаються по табл. 24).

Таблиця 24. – Коефіцієнти B та χ для деяких видів пилу або туману.

Вид пилу або туману	B	χ
1	2	3
Конвертерний пил (при продувці киснем зверху)	$9,88 \cdot 10^{-2}$	0,4663
Тальк	0,206	0,3506
Туман фосфорної кислоти	$1,34 \cdot 10^{-2}$	0,6312
Ваграночний пил	$1,355 \cdot 10^{-2}$	0,6210
Колошниковий (доменний) пил	$6,61 \cdot 10^{-3}$	0,891
Пил вапнякових печей	$6,5 \cdot 10^{-4}$	1,0529
Пил, що містить оксиди цинку, з печей, що виплавляють латунь	$2,34 \cdot 10^{-2}$	0,5317
Лужний аерозоль з вапнякових печей	$5,53 \cdot 10^{-5}$	1,2295

Продовження табл.24.

1	2	3
Аерозоль сульфату міді	$2,14 \cdot 10^{-4}$	1,0679
Речовини з неприємним запахом	$1,09 \cdot 10^{-5}$	1,4146
Пил мартенівських печей, що працюють на кисне-збагаченому дутті	$1,565 \cdot 10^{-6}$	1,619
Пил мартенівських печей, що працюють на повітряному дутті	$1,74 \cdot 10^{-6}$	1,594
Пил з томасівського конвертера	0,268	0,2589
Пил з доменних печей	0,1925	0,3255
Пил, що утворюється при виплавці 45% феросиліцію в закритих електропечах	$2,42 \cdot 10^{-5}$	1,26
Пил, що утворюється в печах виробництва целюлози	$4 \cdot 10^{-4}$	1,05
Виробництво чорного щолоку: обробка попередньо зволжених газів	$1,32 \cdot 10^{-3}$	0,861
Виробництво чорного щолоку: обробка сухих газів	$9,3 \cdot 10^{-4}$	0,861
Пил закритої печі, що виплавляє вуглецевий ферохром	$6,49 \cdot 10^{-5}$	1,1
Зола димових газів ТЕЦ (пиловидне спалювання багатозольного вугілля)	$4,34 \cdot 10^{-3}$	0,3

Продовження табл.24.

1	2	3
Солі натрію з газів, що утворюються при спалюванні стічних вод	$0,21 \cdot 10^{-5}$	1,515
Пил печі КС при виробництві калійних добрив	$90,5 \cdot 10^{-11}$	2,92
Пил, що виноситься з циклонів, при виробництві фосфорних добрив	0,12	0,454
Часточки поташу з МГД-установок відкритого циклу	0,016	0,554
Пил, що утворюється при виплавці силікомарганцю в закритих електроферосплавних печах	$6,9 \cdot 10^{-3}$	0,67
Пил каолінового виробництва	$2,34 \cdot 10^{-4}$	1,115
Уловлення сажі, що утворюється при електрокрекінгу метана	$1 \cdot 10^{-5}$	1,36
Возгонки свинцю і цинку з шахтних печей	$6,74 \cdot 10^{-3}$	9,4775
Пил димових газів карбідної печі	$0,823 \cdot 10^{-3}$	0,914

Загальний гідравлічний опір скрубера Вентурі:

$$\Delta P_{\text{ап}} = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{кр}} = K_{\text{ч}} - P_{\text{ж}} \cdot m \text{ [Па]}, \quad (4.60)$$

де $\Delta P_{\text{тр}}$ – гідравлічний опір труби Вентурі, Па; $\Delta P_{\text{кр}}$ – гідравлічний опір краплевловлювача, Па; $P_{\text{ж}}$ – напір зрошувальної рідини, Па (приймається в середньому 300 кПа); m – питоме зрошення труби Вентурі, $\text{м}^3/\text{м}^3$ газу (на

практиці приймається 0,25-1,5 дм³/м³ при швидкості газів в горловині 40-150 м/с, причому більшим значенням швидкості відповідають менші значення питомого зрошення і навпаки).

Гідравлічний опір труби Вентурі складається з гідравлічного опору труби, що обумовлюється рухом газів (без подачі зрошення), ΔP_r та гідравлічним опором труби, що обумовлюється вводом зрошувальної рідини, $\Delta P_{\text{ж}}$:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_r + \Delta P_{\text{ж}} = \xi_{\text{сух}} \cdot v_r^2 \cdot \rho'_r / 2 + A \cdot \xi_{\text{сух}} \cdot m^{1+B} \text{ [Па]}, \quad (4.61)$$

де $\xi_{\text{сух}}$ – коефіцієнт гідравлічного опору сухої труби-розпилювача (приймається в межах від 0,12 до 0,15 для круглої та прямокутної горловини довжиною $0,15d_e$, де d_e – еквівалентний діаметр горловини, м ; v_r – швидкість газів в горловині при робочих умовах на виході з труби-розпилювача (до 150 м/с); ρ'_r – щільність газу на виході з труби Вентурі, кг/м³; $A, 1+B$ – емпіричні коефіцієнти, значення яких для деяких труб-розпилювачів приведені в табл.25.

Гідравлічний опір краплевловлювача розраховується за формулою:

$$\Delta P_{\text{кр}} = \xi_{\text{кр}} \cdot \omega^2 \cdot \rho'_r / 2 \text{ [Па]}, \quad (4.62)$$

де $\xi_{\text{кр}}$ – гідравлічний опір краплевловлювача (приймається $\xi_{\text{кр}}=16-22$); ω – швидкість газів в перерізі краплевловлювача (приймаємо згідно практичним рекомендаціям $v_{\text{ц}} = 4,5$ м/с).

Щільність газу на вході в скруббер Вентурі при робочих умовах:

$$r_z = r_0 \frac{273 \cdot (101,3 \cdot 10^3 - P_B)}{(273 + t_B) \cdot 101,3 \cdot 10^3} \text{ [кг/м}^3\text{]}, \quad (4.63)$$

де P_B – розрідження перед газоочищенням в скруббері Вентурі, Па; t_B – температура газу перед скруббером Вентурі, °С; ρ_0 – щільність газу при нормальних умовах, кг/м³.

Таблиця 25. – Значення коефіцієнтів А та 1+В.

Спосіб підводу зрошення в трубу-розпилювач	Швидкість газів в горловині, м/с	Довжина горловини труби-розпилювача l_r , м	Коефіцієнт	
			А	1+В
Центральний та плівковий спосіб підводу	>80	(0,15-12,0) d_e	$1,68(l_r/d_e)^{0,29}$	$1-1,12(l_r/d_e)^{-0,045}$
	<80		$3,49(l_r/d_e)^{0,266}$	$1-0,98(l_r/d_e)^{0,026}$
Центральний підвід зрошення в конфузори труби оптимальної конфігурації	40-150	0,15 d_e	0,63	-0,3

Витрата газу при робочих умовах:

$$V_z = \frac{V \cdot r_0}{3600 r_z} \text{ [м}^3\text{/с]}, \quad (4.64)$$

де V – витрата газу, м³/год.

Витрата зрошувальної рідини знаходиться за формулою:

$$M_{ж} = m \cdot V_z \cdot r_{ж} \text{ [кг/с]}, \quad (4.65)$$

де $\rho_{ж}$ – щільність зрошувальної рідини, кг/м³.

Температура газів на виході з труби Вентурі розраховується за формулою:

$$t_B' = (0,133 - 0,041 \cdot m) \cdot t_B + 31 \text{ [}^{\circ}\text{C]}, \quad (4.66)$$

де m вимірюється в $\text{дм}^3/\text{м}^3$.

На практиці експлуатації промислових установок температура газів на виході з труб Вентурі складає $50-55\text{ }^\circ\text{C}$.

Приймаючи, що гідравлічний опір краплєвловлювача значно не впливає на розрахунок, знаходимо щільність газу на виході з труби Вентурі при робочих умовах:

$$r_z' = r_z \frac{273 \cdot (101,3 \cdot 10^3 - P_B - \Delta P_{an})}{(273 + t_B') \cdot 101,3 \cdot 10^3} \text{ [кг/м}^3\text{]}. \quad (4.67)$$

Витрата газу на виході з труби Вентурі при робочих умовах:

$$V_z' = \frac{V \cdot r_0}{3600 r_z'} \text{ [м}^3\text{/с]}. \quad (4.68)$$

Швидкість газів в горловині труби Вентурі визначаємо за формулою:

$$u_z = \sqrt{\frac{2 \Delta P_{mp}}{x_{cux} \cdot r_z' + x_{ж} \cdot r_{ж} \cdot m}} \text{ [м/с]}, \quad (4.69)$$

де $\xi_{ж} = A \cdot \xi_{cux} \cdot m^{1+B}$.

Діаметр горловини труби Вентурі:

$$d_z = 1,13 \sqrt{\frac{V_z'}{u_z}} \text{ [м]}. \quad (4.70)$$

Діаметр краплєвловлювача знаходиться за формулою:

$$D_y = 1,13 \sqrt{\frac{V_z'}{u_y}} \text{ [м]}. \quad (4.71)$$

Розглянемо на прикладі 1:

Вхідні параметри:

витрата газу $V = 150000 \text{ м}^3/\text{год}$;

температура газу на вході в скруббер Вентурі $t_B = 200 \text{ }^\circ\text{C}$;

розрідження перед газоочищенням в скруббері Вентурі $P_B = 5 \text{ кПа}$;

вхідна концентрації забруднювача $C_{\text{вх}} = 1 \text{ г/м}^3$;

вихідна концентрації забруднювача $C_{\text{вих}} = 0,04 \text{ г/м}^3$;

щільність газу $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$;

вид пилу - пил силумінових печей;

зрошувальна рідина – вода;

$\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Розраховуємо необхідну ефективність роботи апарату:

$$h = 1 - \frac{0,04}{1} = 0,96.$$

Розраховуємо число одиниць переносу:

$$N_q = \ln \frac{1}{1 - 0,96} = 3,22.$$

Використовуючи дані табл.24 та прирівнюючи пил силумінових печей до пилу мартенівських печей, що працюють на повітряному дутті, знаходимо питому енергію K_q , що витрачається на пилогазовлювання, з рівняння:

$$3,22 = 1,74 \cdot 10^{-6} K_q^{1,594}.$$

Звідси $K_q = 8545 \text{ кДж/1000 м}^3 \text{ газа}$.

Приймаючи питоме зрошення труби Вентурі $m = 0,8 \text{ дм}^3/\text{м}^3$, розраховуємо загальний гідравлічний опір скрубера Вентурі:

$$\Delta P_{\text{ап}} = 8545 - 300000 \cdot 0,0008 = 8305 \text{ Па.}$$

Щільність газу на вході в скруббер Вентурі при робочих умовах:

$$r_z = 1,29 \cdot \frac{273 \cdot (101,3 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3)}{(273 + 200) \cdot 101,3 \cdot 10^3} = 0,71 \text{ кг/м}^3.$$

Витрата газу при робочих умовах:

$$V_z = \frac{150000 \cdot 1,29}{3600 \cdot 0,71} = 75,7 \text{ м}^3/\text{с} = 272535 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Витрата зрошувальної рідини:

$$M_{\text{жс}} = 0,0008 \cdot 75,7 \cdot 1000 = 60,6 \text{ кг/с} = 218 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Розраховуємо температуру газів на виході з труби Вентурі:

$$t_B' = (0,133 - 0,041 \cdot 0,8) \cdot 200 + 35 = 55 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Щільність газу на виході з труби Вентурі при робочих умовах:

$$r_z' = 1,29 \cdot \frac{273 \cdot (101,3 \cdot 10^3 - 5000 - 8305)}{(273 + 55') \cdot 101,3 \cdot 10^3} = 0,93 \text{ кг/м}^3.$$

Витрата газу на виході з труби Вентурі при робочих умовах:

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

Приймаючи $\xi_{\text{кр}} = 20$, знаходимо гідравлічний опір краплевловлювача:

$$\Delta P_{\text{кр}} = 20 \cdot 4,5^2 \cdot 0,93 / 2 = 188 \text{ Па.}$$

Тоді гідравлічний опір труби Вентурі дорівнює:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_{\text{ап}} - \Delta P_{\text{кр}} = 8305 - 188 = 8117 \text{ Па.}$$

Приймаючи центральний підвід зрошення в конфузори труби оптимальної конфігурації, $\xi_{\text{сyx}} = 0,15$ та користуючись даними табл.25, знаходимо:

$$\xi_{\text{ж}} = 0,63 \cdot 0,15 \cdot 0,0008^{-0,3} = 0,803.$$

Визначаємо швидкість газів в горловині труби Вентурі:

$$u_{\text{г}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8117}{0,15 \cdot 0,93 + 0,803 \cdot 1000 \cdot 0,0008}} = 144 \text{ м/с}.$$

Діаметр горловини труби Вентурі:

$$d_{\text{г}} = 1,13 \sqrt{\frac{57,8}{144}} = 0,716 \text{ м}.$$

Отриманий діаметр значно перевищує найбільший діаметр горловини типорозмірного ряду високонапірних труб Вентурі оптимальної конфігурації (0,42 м за табл.22), у зв'язку з чим необхідно встановити декілька паралельно працюючих труб. В такому випадку діаметр горловини кожної з восьми ідентичних труб дорівнює:

$$d_{\text{г}} = 1,13 \sqrt{\frac{57,8}{8 \cdot 144}} \approx 0,25 \text{ м}.$$

Вибираємо 8 труб Вентурі ГВПВ-0,045-400 з діаметром горловини 0,24 м з продуктивністю 13800-28000 м³/год, при цьому витрата зрошувальної рідини складає 9,75-30,00 м³/год, габаритні розміри - 880×1420×4620 мм, масою 400 кг.

Приймаємо швидкість газу на вході в конфузори (ω_1) і на виході з дифузора (ω_2) труби Вентурі, що дорівнює 20 м/с. При цій швидкості діаметр вхідного перерізу конфузора складає:

$$d' = 1,13 \sqrt{\frac{V_{\text{г}}}{n \cdot \omega_1}} = 1,13 \sqrt{\frac{75,7}{8 \cdot 20}} = 0,78 \text{ м}.$$

Діаметр вихідного перерізу дифузора:

$$d'' = 1,13 \sqrt{\frac{V_2'}{n \cdot w_2}} = 1,13 \sqrt{\frac{57,8}{8 \cdot 20}} = 0,68 \text{ м.}$$

Розрахунок геометричних параметрів труби Вентурі проводиться по співвідношенням за табл.21.

Знаходимо діаметр краплевловлювача:

$$D_{\text{ц}} = 1,13 \sqrt{\frac{57,8}{8 \cdot 4,5}} = 1,43 \text{ м.}$$

За табл.19 вибираємо 8 скрубєрів ЦС-ВТІ без подачі води на зрошення діаметром 1,4 м, висотою 7,67 м, пропускною здатністю 7,4 м³/с.

Розглянемо на прикладі 2:

Вхідні параметри:

витрата газу $V = 4,2 \text{ м}^3/\text{с} = 15120 \text{ м}^3/\text{год}$;

температура газу на вході в скрубєр Вентурі $t_{\text{в}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

тиск перед газоочищенням в скрубєрі Вентурі $P = 101,3 \text{ кПа}$;

вхідна концентрації забруднювача $C_{\text{вх}} = 0,0049 \text{ кг/м}^3$;

вихідна концентрації забруднювача $C_{\text{вих}} = \text{ПДК}_{\text{р.з.}} = 20 \text{ мг/м}^3 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$;

вид забруднюючого газу –аміак;

зрошувальна рідина – вода;

$\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$;

$\rho_{\text{аміаку}} = 0,771 \text{ кг/м}^3$ (за табл.15);

$\rho_{\text{повітря}} = 1,293 \text{ кг/м}^3$ (за табл.15).

Знаходимо концентрацію аміаку на вході в скрубєр Вентурі в об'ємних відсотках:

$$W_{\text{вх}} = C_{\text{вх}} \cdot 22,4 \cdot 100 / M_{\text{аміаку}} = 0,0049 \cdot 22,4 \cdot 100 / 17,03 = 0,64451 \text{ \%},$$

де $M_{\text{аміаку}}$ – молекулярна вага аміаку.

Тоді щільність газу на вході в абсорбер:

$$\rho_0 = (\rho_{\text{аміаку}} \cdot W_{\text{вх}}/100) + (\rho_{\text{повітря}} \cdot W_{\text{повітря}}/100) = (0,771 \cdot 0,64451/100) + (1,293 \cdot 99,35549/100) = 1,2896 \text{ кг/м}^3.$$

Розраховуємо необхідну ефективність роботи апарату:

$$h = 1 - \frac{20 \cdot 10^{-6}}{0,0049} = 0,9959.$$

Розраховуємо число одиниць переносу:

$$N_q = \ln \frac{1}{1 - 0,9959} = 5,5.$$

Використовуючи дані табл.24 та прирівнюючи туман аміаку до туману речовин з неприємним запахом, знаходимо питому енергію K_q , що витрачається на газовлювання, з рівняння:

$$5,5 = 1,09 \cdot 10^{-5} K_q^{1,4146}.$$

Звідси $K_q = 10752 \text{ кДж/1000 м}^3 \text{ газа.}$

Враховуючи високе значення K_q , приймаємо питоме зрошення труби Вентурі $m = 1 \text{ дм}^3/\text{м}^3$ та розраховуємо загальний гідравлічний опір скрубера Вентурі:

$$\Delta P_{\text{ап}} = 10752 - 300000 \cdot 0,001 = 10452 \text{ Па.}$$

Так як тиск перед газоочищенням в скрубєрі Вентурі складає 1 атм, тоді щільність газу на вході в скрубєр Вентурі при робочих умовах:

$$\rho_z = 1,2896 \cdot \frac{273}{(273 + 25)} = 1,18 \text{ кг/м}^3.$$

Витрата газу при робочих умовах:

$$V_z = \frac{15120 \cdot 1,2896}{3600 \cdot 1,18} = 4,59 \text{ м}^3/\text{с} = 16524 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Витрата зрошувальної рідини:

$$M_{\text{жс}} = 0,001 \cdot 4,59 \cdot 1000 = 4,59 \text{ кг/с} = 16,52 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Охолодження газів з початковою низькою температурою в скрубєрі Вентурі відбувається не більше ніж на 1-2 °С. Тому без великої похибки приймаємо температуру газу на виході з скрубєру $t_B' = 23 \text{ °С}$.

Щільність газу на виході з труби Вентурі при робочих умовах:

$$r_z' = 1,2896 \cdot \frac{273 \cdot (101,3 \cdot 10^3 - 10452)}{(273 + 23') \cdot 101,3 \cdot 10^3} = 1,07 \text{ кг/м}^3.$$

Витрата газу на виході з труби Вентурі при робочих умовах:

$$V_z' = \frac{15120 \cdot 1,2896}{3600 \cdot 1,07'} = 5,06 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Приймаючи $\xi_{\text{кр}} = 20$, знаходимо гідравлічний опір краплєвловлювача:

$$\Delta P_{\text{кр}} = 20 \cdot 4,5^2 \cdot 1,07/2 = 217 \text{ Па}.$$

Тоді гідравлічний опір труби Вентурі дорівнює:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_{\text{ап}} - \Delta P_{\text{кр}} = 10452 - 217 = 10235 \text{ Па}.$$

Приймаючи центральний підвід зрошення в конфузєр труби оптимальної конфігурації, $\xi_{\text{сух}} = 0,15$ та користуючись даними табл.25, знаходимо:

$$\xi_{\text{ж}} = 0,63 \cdot 0,15 \cdot 0,001^{-0,3} = 0,75.$$

Визначаємо швидкість газів в горловині труби Вентурі:

$$u_z = \sqrt{\frac{2 \cdot 10235}{0,15 \cdot 1,07 + 0,75 \cdot 1000 \cdot 0,001}} = 149,9 \text{ м/с}.$$

Діаметр горловини труби Вентурі:

$$d_z = 1,13 \sqrt{\frac{5,06}{149,9}} = 0,208 \text{ м.}$$

Вибираємо трубу Вентурі ГВПВ-0,030-400 з діаметром горловини 0,2 м з продуктивністю 9320-18900 м³/год, при цьому витрата зрошувальної рідини складає 13,00-38,00 м³/год, габаритні розміри - 790×1355×4025 мм, масою 310 кг.

Приймаємо швидкість газу на вході в конфузор (ω_1) і на виході з дифузора (ω_2) труби Вентурі, що дорівнює 20 м/с. При цій швидкості діаметр вхідного перерізу конфузора складає:

$$d' = 1,13 \sqrt{\frac{V_z}{\omega_1}} = 1,13 \sqrt{\frac{4,59}{20}} = 0,54 \text{ м.}$$

Діаметр вихідного перерізу дифузора:

$$d'' = 1,13 \sqrt{\frac{V_z'}{\omega_2}} = 1,13 \sqrt{\frac{5,06}{20}} = 0,57 \text{ м.}$$

Розрахунок геометричних параметрів труби Вентурі проводиться по співвідношенням за табл.21.

Знаходимо діаметр краплевловлювача:

$$D_u = 1,13 \sqrt{\frac{5,06}{4,5}} = 1,2 \text{ м.}$$

За табл.19 вибираємо скруббер ЦС-ВТІ без подачі води на зрошення діаметром 1,2 м, висотою 6,71 м, пропускною здатністю 5,3 м³/с.

4.8. Розрахунок рукавного фільтру

Найбільш розповсюджені у процесі пиловловлювання такі типи рукавних фільтрів як ФРКІ та ФРКДІ. Важливим елементом фільтру є

корпус. В склад корпусу рукавних фільтрів входить бункер, кут нахилу стінок якого повинен бути більше кута природного укосу пилю, що вловлюється. У більшості апаратів кут нахилу стінок бункеру до горизонту складає 60°. У фільтрах, які використовуються для уловлення сажі та деяких інших видів пилю, що важко зсипаються, кут нахилу приймають рівним 70°.

В якості фільтрувальних перегородок використовують матеріали, приведені в табл.26. Тканинні матеріали являють собою переплетіння ниток діаметром 300-700 мкм. В разі спеціальної обробки – ворсування на поверхні тканини утворюється ворс з переплутаних між собою волокон. Повздовжні нитки називають основою, перетинні – утком. Основні властивості текстильних волокон тканин описані в табл.27.

В рукавних фільтрах типу ФРКІ забруднений газ проходить через тканину закритих знизу рукавів в напрямку ззовні всередину; очищений газ виходить через верхні відкриті кінці рукавів і видаляється з апарату. Кожен рукав закріплений на верхній решітці та натягнутий на жорсткий каркас. У фільтрів ФРКІ-30, ФРКІ-60 та ФРКІ-90, що складаються відповідно з однієї, двох та трьох секцій, висота рукавів однакова – 2 м. Кількість секцій в фільтрах ФРКІ-180 (однорядних) та ФРКІ-360 (двохрядних) складає відповідно 4 та 8, а висота рукавів – 3 м. Запилений газ подається в корпус через патрубки на бокових стінках бункерів. Виключенням є фільтр ФРКІ-360, в якому вхідний та вихідний патрубки розташовані на торцевих стінках.

Таблиця 26. - Хімічна характеристика фільтрувальних матеріалів.

Найменування	Підприємство, що виготовляє	Маса 1 м ² , г	Найменування волокна	Переплетіння в число ниток на 10 см*	Розривне навантаження смужки 50×100 мм*, кгс	Подовження при розриві*, %	Вигіно-стійкість при 10%-му навантаженні від розриву*, число циклонів	Повітря-проникність при Р=5 мм вод. ст., дм ³ /(м ² ·с)	Термо-стійкість при тривалій експлуатації, °С.	Луго-кислото-стійкість**	Ступінь очищення (на біхромат), %	Відносна вартість 1 м ² матеріалу (до лавсану арт.217 на стан 1979 р.)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Тканина лавсанова фільтрувальна арт.217. Рукава лавсанові фільтрувальні арт.216 ТУ 17 РРФСР 81-74-75	К-т ім. Тельмана (Санкт-Петербург)	424±25	Полі-ефірне	Саржа 2/2 <u>220±4</u> 161±10	<u>176</u> 201	<u>49</u> 32	<u>42390</u> 16426	166	130	<u>Задов.</u> Добр.	42	1
Тканина лавсанова фільтрувальна арт.86013 ОСТ 17-452-74	Караблінський к-т шовкових виробів (Рязанська обл.)	310±15	Полі-ефірне	Саржа 2/2 <u>389±8</u> 190±6	<u>261</u> 141	<u>50</u> 29	<u>31928</u> 33039	136	130	<u>Задов.</u> Добр.	37	0,9
Тканина лавсанова фільтрувальна арт.86033 ТУ 17 УРСР 3238-78	Луцький меланжевий к-т	316±16	Полі-ефірне	Саржа 2/2 <u>326±6</u> 159±5	<u>244</u> 136	<u>40</u> 26	<u>18988</u> 17459	180	130	<u>Задов.</u> Добр.	32	1,1

Продовження табл.26.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Тканина лавсанова фільтрувальна з одностороннім лавсаном (подвійний лавсан) арт.86013 ТУ17 РРФСР 8053-78	Золотовська ткацька фабрика	970± 47	Полі-ефірне	Саржа 2/2 двох-шарова <u>184±6</u> 154±5	<u>622</u> 578	<u>39</u> 39	<u>34158</u> 30640	69	130	<u>Задов.</u> <u>Добр.</u>	66,65	1,8
Войлок голкопробивний фільтрувальний арт.204-Э ТУ 17 ЕРСР 413-77	НВО «Містра» (Таллінн)	580± 58	Полі-ефірне	Нетканый	<u>130</u> 94	<u>67</u> 70	<u>92621</u> 73055	110	130	<u>Задов.</u> <u>Добр.</u>	51,49	0,47
Полотно холстопршивне фільтрувальне арт.931507 ТУ 17 РРФСР 5910-72	Інзенська ф-ка нетканых матеріалів (Пензенська обл.)	500± 30	Полі-ефірне	Неткане	<u>87</u> 230	<u>47</u> 56	<u>35071</u> 22537	348	130	<u>Задов.</u> <u>Добр.</u>	23	0,8
Полотно холстопршивне фільтрувальне арт.931506 ТУ 17 РРФСР 6801-74	Інзенська ф-ка нетканых матеріалів (Пензенська обл.)	400± 24	Полі-ефірне	Неткане	<u>38</u> 173	<u>21</u> 38	<u>22245</u> 26150	611	130	<u>Задов.</u> <u>Добр.</u>	20	0,19

Продовження табл.26.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Тканина фільтрувальна нітронова арт.133 ТУ РРФСР 17-5509- 72	Ф-ка «Красный Октябрь» (м.Сурськ Пензенської обл.)	426± 43	Полі- акрило- нітри- льна	Саржа 2/2 <u>104±5</u> 98±6	<u>151</u> 115	<u>24</u> 22	<u>2747</u> 2628	100	120	Від задов. <u>до добр.</u> Добр.	41	0,97
Полотно голкопробивне фільтрувальне антистатичне арт.931521 ТУ 17 РРФСР 1443- 77	Московська ковдро-платочна фабрика	600± 30	Полі- ефірне + 5% ніхрома	Неткане	<u>149</u> 66	<u>46</u> 34	<u>200000</u> 138690	231	130	<u>Задов.</u> Добр.	27,1	2,3
Тканина фільтрувальна нітронова подвійного плетіння	Усть- каменогорський текстильний к-т	545± 27	Полі- акрило- нітри- льна	Саржа 2/2 двохша- рова <u>256</u> 224	<u>181</u> 168	<u>53</u> 44	<u>17290</u> 5960	71	120	<u>Добр.</u> Задов.	36	-
Тканина технічна фільтрувальна ТТО-3 і ТТО-4 ТУ 6-0631-124- 76	Світлогорський завод штучного волокна	500± 20	Полі- окси- діазол	Саржа 2/2 <u>120</u> 100	<u>326</u> 313	<u>17</u> 13	<u>5295</u> 5054	110	200	<u>Задов.</u> Добр.	12,25	1,4

Продовження табл.26.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Тканина скляна фільтрувальна текстурована ТСФТ-2-СГФ ТУ 6-11-375-76	Полоцький завод скловолокна (Вітебська обл.)	617	алюмо- магне- зціальне скло ^{3*}	Саржа 3/1 <u>200</u> 110	<u>328</u> 209	<u>7</u> 7	<u>12</u> 21	180	250	<u>Задов.</u> Добр.	35,64	0,42
Сукно фільтрувальне № 2 арт.20 ГОСТ 6986-69	Ф-ка «Красный Октябрь» (м.Сурськ Пензенської обл.)	341± 15	Шерсть, капрон	Саржа 2/2 <u>220±4</u> 161±10	<u>58</u> 60	<u>25</u> 52	<u>38370</u> 107680	152	90	<u>Задов.</u> Поган.	39	0,33
Сукно технічне полушерстяне ЦМ арт. 83 ТУ 17 РРФСР 42- 4791-76	К-т ім. Тельмана (Санкт- Петербург)	500± 30	Шерсть, капрон	Саржа 2/2 <u>106±2</u> 100±6	<u>79</u> 58	<u>29</u> 40	<u>83396</u> 66712	244	90	<u>Задов.</u> Поган.	20	1,05
Сукно технічне полушерстяне РЦЛ арт. 115 ТУ 17 РРФСР 42- 4641-76	К-т ім. Тельмана (Санкт- Петербург)	1444 ±86	Шерсть, капрон	Саржа 2/2 <u>133±3</u> 269±16	<u>122</u> 85	<u>52</u> 90	<u>162088</u> 105216	46	90	<u>Задов.</u> Поган.	60	2,8

* Чисельник – по основі, знаменник – по утку.

** Чисельник – стійкість до лугів, знаменник – до кислот.

3* Апрет – силіконографітовий політетрафторетилен.

Таблиця 27. - Основні властивості текстильних волокон тканин *.

Вихідний полімер або сировина	Назва волокна	Щільність, кг/м ³	Термостійкість, °С, при дії		Хімічна стійкість в різних середовищах				Горючість	Міцність на розрив, МПа	Подовження при розриві, %	Стійкість до стирання	Вологоємність, %, при 20 °С	
			довготривалій	короткочасній	кислоти	луги	окислювачі	Розчинники					при φ=65 %	при φ=90-95 %
Целюлоза	Хлопок	1520	65-85	90-95	ДП	Д	З	ДД	Так	360-530	7-8	З	7-8,5	24-27
Протеїни	Шерсть	1320	95-100	120	З	ДП	З	Д	Так	130-200	30-40	З	13-15	21,9
Поліамід	Капрон Номекс	1140	80-90	120	ДП	ДД	З	Д	Так	450-600	18-32	ДД	3,5-4,5	7-8,5
		1380	220	260	З	ДД	Д	Д	Ні	400-800	14-17	ДД	-	-
Поліефір	Лавсан	1380	130	160	Д	З-П	Д	Д	Так	450-700	15-25	ДД	0,4	0,5
Поліакрилонітрил	Нітрон	1170	120	150	Д-З	З	Д	Д	Так	300-470	15-17	З	0,9-2	4,5-5
Поліолефін	Поліпропілен	920	85-95	120	ДД	ДД	Д	Д	Так	440-860	22-25	ДД	0	0
Полівинілхлорид	Хлорин	1380-1470	65-70	80-90	ДД	ДД	ДД	Д	Ні	180-230	15-30	ДП-П	0,17-0,3	0,7-0,9
Політетрафторетилен	Фторопласт, поліфен	2300	220	270	ДД	ДД	ДД	ДД	Ні	350-400	50	З	0	0
Поліоксидіазол	Оксалон	-	250	270	Д	-	-	-	-	-	-	Д	-	-
Алюмоборосилкатне скло	Скляне волокно	2540	240	315	Д	З	ДД	ДД	Ні	1600-3000	3-4	ДП	0,3	-

*ДД – дуже добра; Д – добра; З – задовільна; П – погана; ДП – дуже погана.

Регенерацію проводять без відключення секцій імпульсами стисненого повітря, що подається всередину рукавів зверху через отвори в продувочних колекторах. Тривалість імпульсів – 0,1-0,2 с. Подача імпульсів забезпечується електромагнітними клапанами за допомогою системи автоматики. Система регенерації розрахована на використання стисненого повітря під тиском 0,6 МПа. Стиснуте повітря в фільтрах повинно бути осушене та очищене не нижче 10 кл. по ГОСТ 17433-72. Витрату повітря розраховують виходячи з режиму регенерації при витраті 55 дм³ (н.у.) через одну розподільну трубу за один імпульс.

Корпуси та бункери виготовлені з вуглецевої сталі. Фільтрувальні матеріали: тканина лавсанова фільтрувальна арт.216, 217 (ТУ 17 РРФСР 8174-75); тканина лавсанова фільтрувальна арт.86013 (ОСТ 17-452-74) або арт.86033 (ТУ 17 УРСР 3238-78); войлок голкопробивний фільтрувальний арт.204-Э (ТУ 17 ЕРСР 413-77). Для нормального функціонування необхідна експлуатація в опаленому приміщенні.

Умовне позначення типорозміру електрофільтру: Ф – фільтр; Р – рукавний; К – каркасний; І – з імпульсною продувкою; цифри – площа фільтруючої поверхні в м². На рис.12,13,14 представлені різні конструкції фільтрів типу ФРКІ, а в табл.28 приведена їх технічна характеристика.

Рукавні фільтри типу ФРКДІ (рис.15) використовують ті ж фільтрувальні тканини, що і ФРКІ, але функціонують при температурі забрудненого газу до 130 °С. Фільтр, який розміщений в корпусі коробчатої форми, розділений на 2 ряди секцій. В кожній секції знаходяться 36 рукавів висотою 6 м, закріплених в верхній та нижній частині. Неочищений газ поступає через торцевий колектор. Пил осаджується на зовнішній стороні рукавів і періодично скидається з них в бункер, звідки видаляється шнеками.

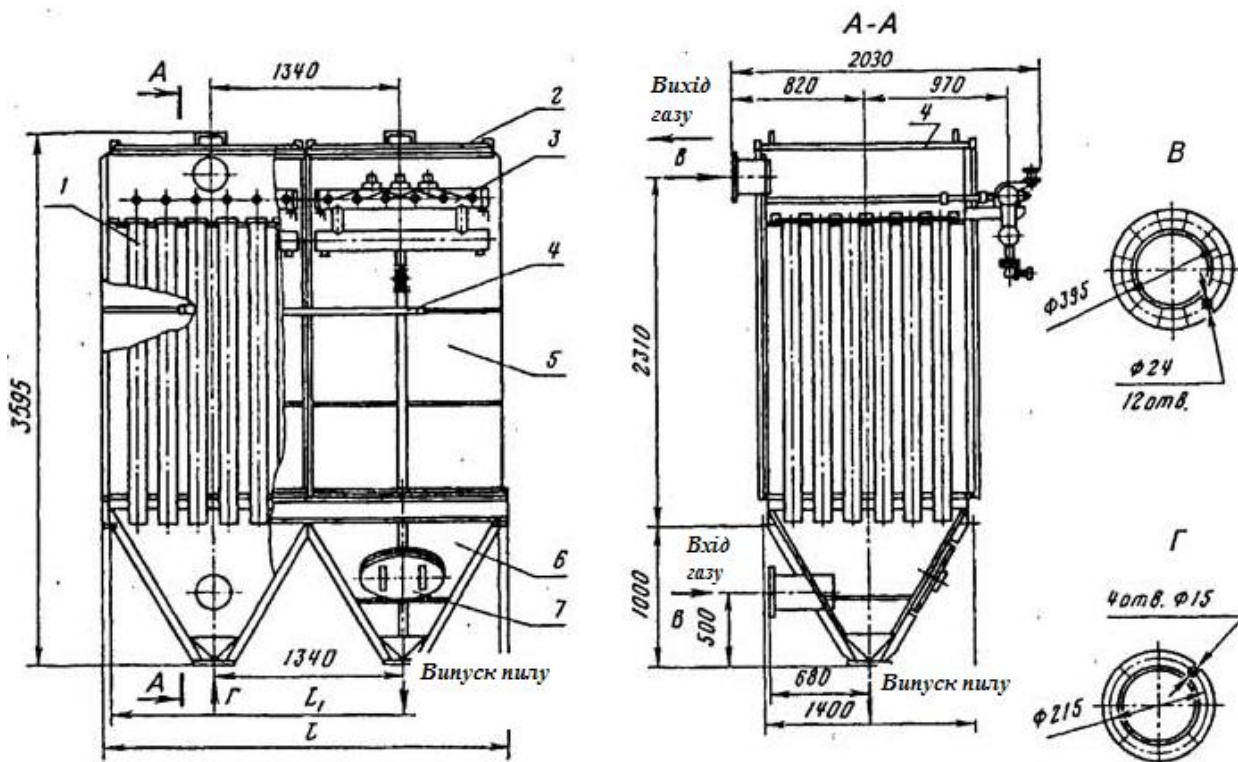


Рис.12. Рукавні фільтри типу ФРКІ (однорядні): 1 – рукав; 2 – кришка; 3 – секція клапанів; 4 – колектор; 5 – корпус; 6 – бункер; 7 – люк.

Регенерація рукавів відбувається за допомогою імпульсів стиснутого повітря, що подається одночасно зверху та знизу.

Умовне позначення типорозміру електрофільтру: Ф – фільтр; Р – рукавний; К – каркасний; ДІ – з двохсторонньою імпульсною продувкою; цифри – площа фільтруючої поверхні в м^2 .

В табл.29 приведена технічна характеристика фільтрів типу ФРКДІ.

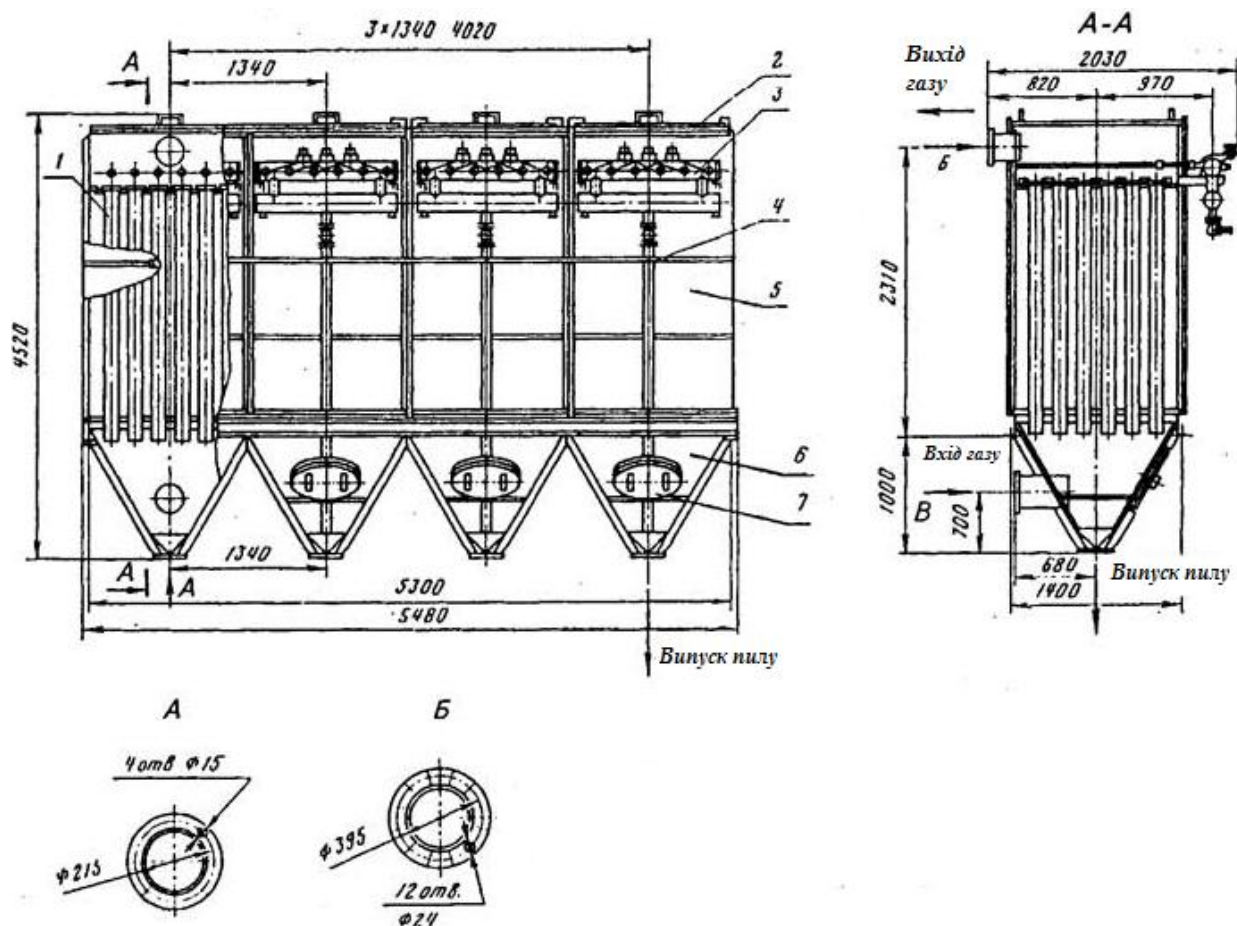


Рис.13. Рукавні фільтри типу ФРКІ-180: 1 – рукав; 2 – кришка; 3 – секція клапанів; 4 – колектор; 5 – корпус; 6 – бункер; 7 – люк.

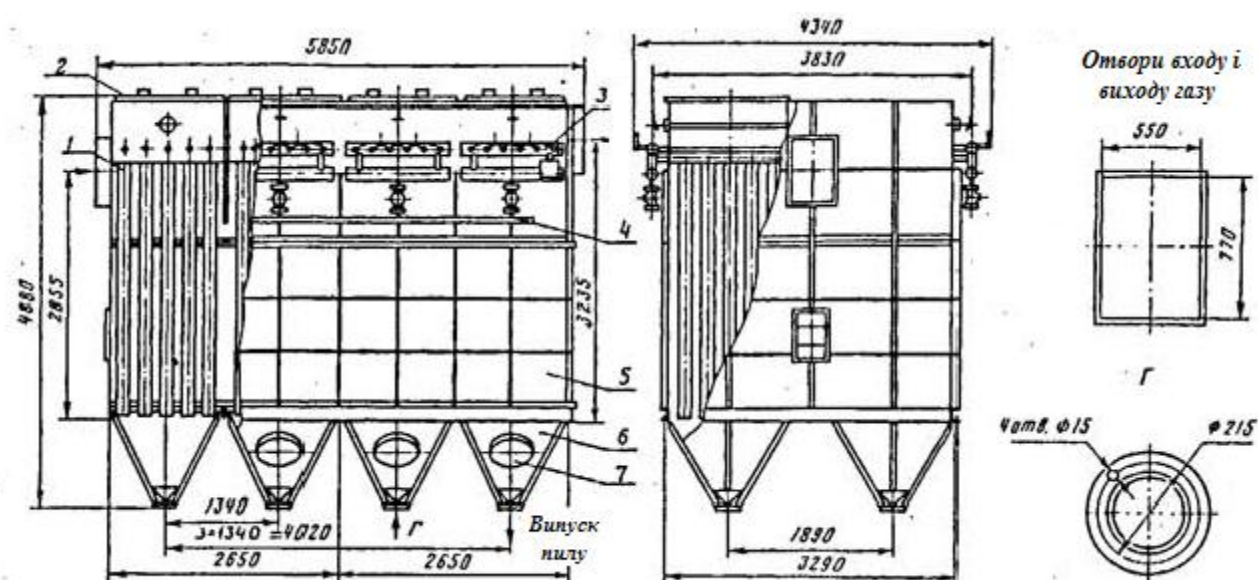


Рис.14. Рукавні фільтри типу ФРКІ-360: 1 – рукав; 2 – кришка; 3 – секція клапанів; 4 – колектор; 5 – корпус; 6 – бункер; 7 – люк.

Таблиця 28. – Технічна характеристика фільтрів типу ФРКІ.

Показник	Типорозмір фільтру				
	ФРКІ-30	ФРКІ-60	ФРКІ-90	ФРКІ-180	ФРКІ-360
1	2	3	4	5	6
Код ОКП	3646311001	3646311002	3646311003	3646311005	3646311006
Площа фільтруючої поверхні, м ²	30	60	90	180	360
Кількість рукавів	36	72	108	144	288
Діаметр рукавів, мм	135	135	135	135	135
Висота рукавів, м	2	2	2	3	3
Кількість електромагнітів	3	6	9	12	24
Кількість мембранних клапанів	6	12	18	24	48
Кількість секцій	1	2	3	4	8
Питоме газове навантаження, м ³ /м ² ·хв, не більше	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Допустима запиленість газу, г/м ³	20	20	20	20	20
Гідравлічний опір, кПа	1,2-2	1,2-2	1,2-2	1,2-2	1,2-2
Тиск продувочного повітря, МПа	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6
Найбільша витрата стиснутого повітря, м ³ /год	10	20	30	60	120

Продовження табл.28.

1	2	3	4	5	6
Допустимий тиск всередині апарату, кПа	5	5	5	5	5
Розмір L_1 , мм	1300	2700	4000	5300	5300
Габаритні розміри, мм: довжина L ширина висота	1460 2030 3595	2820 2030 3595	4140 2030 3595	5480 2030 4520	5850 4340 4880
Маса з рукавами, т, не більше	1,28	2,06	2,99	4,58	9,86

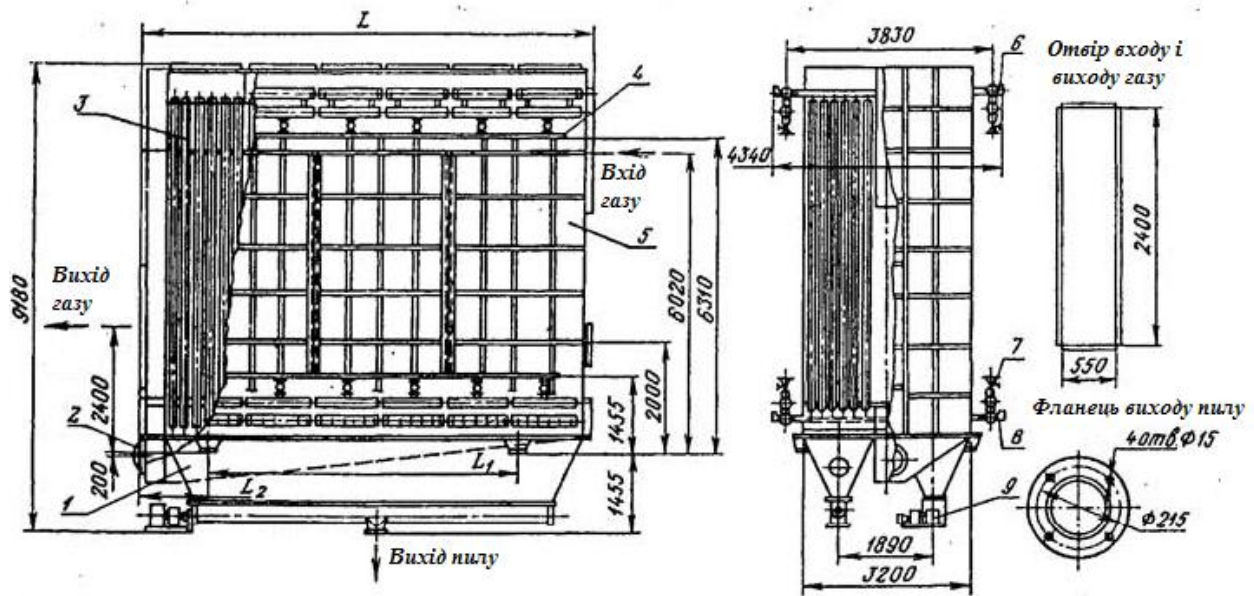


Рис.15. Рукавні фільтри типу ФРКДІ: 1 – бункерна частина корпусу; 2 – люк; 3 – рукав; 4 – колектор; 5- корпус; 6 – секція клапанів; 7 – фланцевий вентилятор; 8 – секція клапанів; 9 – гвинтовий транспортер.

Таблиця 29. - Технічна характеристика фільтрів типу ФРКДІ.

Показник	Типорозмір фільтру		
	ФРКДІ-550	ФРКДІ-720	ФРКДІ-1100
Код ОКП	3646312001	3646312002	3646312003
Площа фільтруючої поверхні, м ²	550	720	1100
Кількість рукавів	216	288	432
Діаметр рукавів, мм	135	135	135
Висота рукавів, м	6	6	6
Кількість мембранних клапанів	72	96	144
Питоме газове навантаження, м ³ /м ² ·хв, не більше	1,6	1,6	1,6
Допустима запиленість газу, г/м ³	50	50	50
Гідравлічний опір, кПа, не більше	2,8	2,8	2,8
Тиск продувочного повітря, МПа	0,6	0,6	0,6
Найбільша витрата стиснутого повітря, м ³ /год	150	200	300
Допустимий тиск всередині апарату, кПа	5	5	5
Розміри, мм L ₁ L ₂	3000 1100	4500 1105	6000 1692
Габаритні розміри, мм: довжина ширина висота	4940 4340 9180	6280 4340 9180	8955 4340 9180
Маса з рукавами, т, не більше	18,4	22,5	31,3

Поверхню фільтрування апарату або групи апаратів визначаємо за формулою:

$$F_{\phi} = \frac{V + V_p}{60q} + F_p \text{ [м}^2\text{]}, \quad (4.72)$$

де V – витрата газу на очищення, м³/год; V_p – витрата газу на регенерацію, м³/год; q – питоме газове навантаження при фільтруванні, м³/(м²·хв); F_p – фільтруюча поверхня, що відключається на регенерацію на протязі 1 год., м².

Для фільтрів з імпульсною продувкою, у зв'язку з короткочасністю процесу регенерації, поверхнею фільтру, що відключається на час регенерації, та об'ємом газу, що витрачається на регенерацію, можна знехтувати. Питоме газове навантаження на фільтрувальну перегородку коливається від 0,3 до 6 м³/(м²·хв), для практичних розрахунків може визначатися за формулою:

$$q = q_n \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5 \text{ [м}^3\text{/(м}^2\text{·хв)]}, \quad (4.73)$$

де q_n – нормативне питоме навантаження, що залежить від виду пилу та його схильності до агломерації (визначається з табл.30); C_1 – коефіцієнт, що характеризує особливість регенерації фільтрувальних елементів; C_2 – коефіцієнт, що враховує вплив концентрації пилу на питоме газове навантаження (визначається за рис.16); C_3 – коефіцієнт, що враховує вплив дисперсного стану пилу в газі (визначається за табл.31); C_4 – коефіцієнт, що враховує вплив температури газу (визначається за табл.32); C_5 – коефіцієнт, що враховує вимоги до якості очищення.

Для коефіцієнта, що характеризує особливість регенерації фільтрувальних елементів, в якості базового варіанту приймають фільтр з імпульсною

Таблиця 30. – Значення нормативного питомого газового навантаження.

Значення $q_n, \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{хв})$				
3,5	2,6	2	1,7	1,2
Комбікорм Мука Зерно Жомова суміш Пил шкіри Тирса Тютюн Картонний пил Полівінілхлорид	Азбест Волокнисті та целюлозні матеріали Пил при вибиванні відливоч з форм Гіпс Вапно гашене Пил від полірування Сіль Пісок Тальк Кальцинована сода	Глинозем Цемент Керамічні барвники Вугілля Плавиловий шпат Гума Каолін Вапно Цукор Пил гірських порід	Кокс Летюча зола Порошки металів Оксиди металів Пластмаси Барвники Силікати Крохмаль Смоли сухі Хімікати з нафтосировини	Активоване вугілля Технічний вуглець Миючі речовини Порошкове молоко Возгонки кольорових та чорних металів

Концентрація пилу, г/м^3

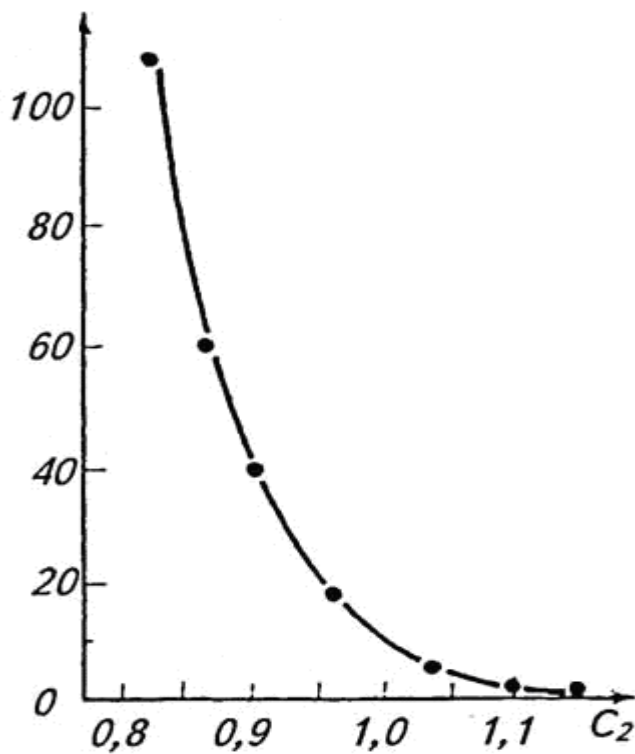


Рис.16. Залежність значення коефіцієнту C_2 від концентрації пилу.

Таблиця 31. – Значення коефіцієнту C_3 , що враховує вплив дисперсного складу пилу.

Медіанний розмір часток пилу, мкм	Коефіцієнт C_3
Більше 100	1,2-1,4
50-100	1,1
10-50	1
3-10	0,9
Менше 3	0,7-0,9

Таблиця 32. – Значення коефіцієнту C_4 , що враховує вплив температури.

t, °C	20	40	60	80	100	120	140	160
C_4	1	0,9	0,84	0,78	0,75	0,73	0,72	0,70

продувкою стиснутим повітрям з тканинними рукавами. Для цього апарату коефіцієнт $C_1 = 1$. При використанні рукавів з нетканих матеріалів значення коефіцієнта може збільшуватись на 5-10 %.

Коефіцієнт, що враховує вимоги до якості очищення, оцінюється по концентрації пилу в вихідному газі. Приймають, що в нормально функціонуючому фільтрі концентрація пилу на виході не повинна перевищувати 30 мг/м³. Для цих умов приймається значення $C_5 = 1$. Якщо до якості очищення ставляться більш жорсткі вимоги, то коефіцієнт C_5 знижується. В разі, якщо концентрація пилу в очищених газах не повинна перевищувати 10 мг/м³, коефіцієнт приймається рівним 0,95.

Визначаємо гідравлічний опір рукавного фільтра:

$$\Delta P_{\phi} = \Delta P_k + \Delta P_n \text{ [Па]}, \quad (4.74)$$

де ΔP_k – опір корпусу апарату, Па; ΔP_n – опір фільтрувальної перегородки, Па.

Опір корпусу апарату визначається за формулою:

$$\Delta P_k = \frac{\xi \cdot r \cdot w_{ex}^2}{2} [\text{Па}], \quad (4.75)$$

де ξ – коефіцієнт гідравлічного опору корпусу апарату (звичайно складає 1,5 -2); ρ - щільність газу, кг/м³; w_{ex} – швидкість газового потоку у вхідному патрубку, м/с.

Швидкість газового потоку у вхідному патрубку можна розрахувати за формулою:

$$w_{ex} = \frac{V}{3600 S_{патр}} [\text{м/с}], \quad (4.76)$$

де $S_{патр}$ – площа вхідного патрубку вибраного фільтру, м².

Гідравлічний опір фільтрувальної перегородки складається з втрат напору за рахунок самої перегородки $\Delta P_n'$ та за рахунок накопиченого на перегородці пилу $\Delta P_n''$:

$$\Delta P_n = \Delta P_n' + \Delta P_n'' [\text{Па}]. \quad (4.77)$$

Величину $\Delta P_n'$ розраховують по формулі:

$$\Delta P_n' = K_n \cdot \mu \cdot v^n [\text{Па}], \quad (4.78)$$

де K_n – коефіцієнт, що характеризує опір фільтрувальної перегородки, м⁻¹; μ – динамічна в'язкість газу, Па·с; v – швидкість фільтрування, м/с; n – показник ступеня, що залежить від режиму протікання газу через перегородку (для ламінарного режиму $n = 1$, для турбулентного - $n > 1$).

Рекомендовані швидкості фільтрування можна взяти з табл.33.

Таблиця 33. – Рекомендовані орієнтовні швидкості фільтрування газів в рукавних фільтрах з імпульсною продувкою в залежності від виду пилу.

Вид пилу	Швидкість фільтрації, м/хв
Сажа, кремнезем, активоване вугілля, цемент	0,8 - 2,0
Возгонки заліза та феросплавів, пил від лиття, глинозем, вапно, корунд, пластмаси	1,5 – 2,5
Тальк, кам'яне вугілля, зола, пил керамічних виробництв, каолін, рудний пил, боксит, вапняк	2,0 – 3,5
Азбест, волокнисті матеріали, перліт, пил від шліфувальних процесів	2,5 – 4,5
Пил від процесів деревообробки, грубі рослинні волокна, шкіряний пил	2,5 – 6,0

Коефіцієнт K_{Π} визначають експериментально. Наприклад, для фільтрувальних тканин з лавсану арт. 136, 217, що вловлюють цементний або кварцовий пил з медіанним діаметром в межах 10-20 мкм, $K_{\Pi} = (1100-1500) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$; для тих же тканин при вловлюванні возгонки від сталеплавильних дугових печей з медіанним діаметром часток 2,5 -3,0 мкм $K_{\Pi} = (2300-2400) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Для більш щільних тканин (лавсан арт.86013, скляна тканина) при вловлюванні возгонки коефіцієнт K_{Π} зростає в 1,2 – 1,3 рази. При вловлюванні пилу з медіанним розміром часток менше 1 мкм коефіцієнт K_{Π} зростає в декілька разів і для лавсану арт. 86013 при вловлюванні возгонки кремнію з медіанним діаметром 0,6 мкм складає $(13000 - 15000) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Величину ΔP_{Π} розраховують за формулою:

$$\Delta P_{\Pi}'' = \mu \cdot t \cdot C_{\text{вх}} \cdot v^2 \cdot K_1 \text{ [Па]}, \quad (4.79)$$

де t – тривалість фільтрувального циклу, с (звичайно приймається 600 с);
 $C_{\text{вх}}$ – концентрація пилу на вході в фільтр, кг/м³; K_1 – параметр опору шару пилу, м/кг.

Величина K_1 визначається експериментально. Наприклад, для цементу з медіанним діаметром часток 12 – 20 мкм $K_1 = (6,5 - 16) \cdot 10^9$ м/кг, для часток кремнію з медіанним діаметром 0,7 мкм $K_1 = 330 \cdot 10^9$ м/кг, для возгонки від сталеплавильних дугових печей з медіанним діаметром часток 3,0 мкм $K_1 = 80 \cdot 10^9$ м/кг.

Варто прийняти до уваги, що загальний опір рукавних фільтрів не повинен перевищувати 2800 Па, а опір шару пилу на перегородці - 600-800 Па.

Ступінь очищення газу від пилу на рукавному фільтрі визначається за формулою:

$$h = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вих}}}{C_{\text{вх}}} \cdot 100\% \text{ [%]}. \quad (4.80)$$

Розглянемо на прикладі:

Вхідні параметри:

витрата газу $V = 50000$ м³/год;

вид пилу – вапняк;

щільність часток пилу $\rho_{\text{ч}} = 1800$ кг/м³;

медіанний діаметр часток пилу $d_{\text{м}} = 3,5$ мкм;

фільтрувальна тканина – лавсан арт. 86013;

температура газу на вході в рукавний фільтр $t_{\text{ф}} = 80$ °С;

концентрація пилу на вході в фільтр $C_{\text{вх}} = 1,5$ г/м³ = $1,5 \cdot 10^{-3}$ кг/м³;

концентрація пилу на виході з фільтру $C_{\text{вих}} = 15$ мг/м³;

щільність газу $\rho = 0,998$ кг/м³;

динамічна в'язкість газу $\mu = 19 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Користуючись табл.30,31,32 та рис.16, з урахуванням вимог до якості очищення визначаємо питоме газове навантаження на фільтрувальну перегородку:

$$q = 2 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 0,9 \cdot 0,78 \cdot 0,96 = 1,48 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{хв}).$$

Знаходимо поверхню фільтрування:

$$F_{\phi} = \frac{50000}{60 \cdot 1,48} = 563 \text{ м}^2.$$

За табл.29 вибираємо для приведених умов фільтр ФРКДІ-550 з фактичною поверхнею фільтрування 550 м^2 та розмірами вхідного патрубку $2,4 \text{ м} \times 0,55 \text{ м}$. Деяке зменшення поверхні припустиме до тих пір, поки не буде перевищене допустиме питоме газове навантаження для фільтрів даного типу $1,6 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{хв}$.

Визначаємо швидкість газового потоку у вхідному патрубку:

$$w_{ex} = \frac{50000}{3600 \cdot 2,4 \cdot 0,55} = 10,52 \text{ м/с}.$$

Задаючись коефіцієнтом гідравлічного опору корпусу $\xi = 2$, знаходимо опір корпусу апарата:

$$\Delta P_{\kappa} = \frac{2 \cdot 0,998 \cdot 10,52^2}{2} = 110 \text{ Па}.$$

Для визначення гідравлічного опору фільтрувальної перегородки приймаємо, що $K_{\Pi} = 2,3 \cdot 10^9 \cdot 1,2 = 2,76 \cdot 10^9 \text{ м}^{-1}$ ($d_m = 3,5 \text{ мкм}$, лавсан арт. 86013); $v = 0,015 \text{ м/с}$; $n = 1$; $K_1 = 80 \cdot 10^9 \text{ м/кг}$. Підставляючи ці значення у формулу, отримуємо:

$$\Delta P_{\Pi} = K_{\Pi} \cdot \mu \cdot v^n + \mu \cdot t \cdot C_{BX} \cdot v^2 \cdot K_1 = 2,76 \cdot 10^9 \cdot 19 \cdot 10^{-6} \cdot 0,015^1 + 19 \cdot 10^{-6} \cdot 600 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,015^2 \cdot 80 \cdot 10^9 = 787 + 308 = 1095 \text{ Па}.$$

Визначаємо гідравлічний опір рукавного фільтра в цілому:

$$\Delta P_{\phi} = 110 + 1095 = 1205 \text{ Па.}$$

Ступінь очищення газу від пилу на рукавному фільтрі:

$$h = \frac{1500 - 15}{1500} \cdot 100\% = 99 \text{ \%}.$$

5. ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Графічна частина складається з креслень, на яких зображуються технологічна схема та на вибір два апарати очисних споруд, що використовуються у обраній технологічній схемі.

Технологічна схема газоочищення відображує послідовність виконання технологічних операцій за допомогою умовних позначень. Вона виконується на аркуші формату А1 без певного масштабу з дотриманням відносних габаритних розмірів апаратів очисних споруд, проте не відображує дійсного їх розміщення відносно одне одного. На технологічній схемі апарати позначаються арабськими цифрами у виносках, потоки руху газу, пилу, рециркуляційного абсорбційного розчину – римськими цифрами. Креслення апаратів очисних споруд виконують в масштабі 1:20, 1:50, 1:100, 1:200 на аркуші формату А1 або А2. Назва, кількість і технічні показники устаткування вказуються у специфікаціях, що наводяться в додатках до пояснювальної записки.

6. ВКАЗІВКИ ПРО ПОРЯДОК ЗАХИСТУ ПРОЕКТУ

Захист курсового проекту включає доповідь, розраховану на 5-7 хвилин. В доповіді повинні освітлюватись такі головні питання:

- тема проекту, її актуальність та своєчасність;
- технологічні операції, на яких відбувається утворення забруднених газів, їх витрата та склад;
- обґрунтування запропонованої технологічної схеми очищення забруднених газів;
- заходи по переробці, утилізації або знешкодженню вловленого пилу та відпрацьованих абсорбційних розчинів.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: Справочное издание. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Страус В. Промышленная очистка газов. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
3. Бретшнайдер Б., Курфюрст И. Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль / Под редакцией А.Ф. Туболкина. – Л.: Химия, 1989. – 288 с.
4. Старк С.Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии. – М.: Металлургия, 1977. – 328 с.
5. Гордон Г.М., Пейсахов И.Л. Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1977. – 456 с.
6. Комарова Л.Ф., Кормина Л.А. Инженерные методы защиты окружающей среды. Техника защиты атмосферы и гидросферы от промышленных загрязнений: Учебное пособие. – Барнаул, 2000. – 391 с.
7. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки: Учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.
8. Юдашкин М.Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии. – М.: Металлургия, 1984. – 320 с.
9. Швыдкий В.С., Ладыгичев М.Г. Очистка газов: Справочное издание. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.
10. Белевецкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений. – Л.: Химия, 1990. – 288 с.
11. Балабеков О.С., Балтабаев Л.Ш. Очистка газов в химической промышленности. Процессы и аппараты. – М.: Химия, 1991. – 256 с.
12. Охрана окружающей среды: Учебник для техн. спец. ВУЗов / С.В. Белов, Ф.А. Барбинов, А.Ф. Козьяков и др. – М.: Высшая школа, 1991. – 319 с.

- 13.Проектирование аппаратов пылегазоочистки / М.Г. Зиганшин, А.А. Колесник, В.Н. Посохин. –М.: Экопресс-ЗМ, 1988. – 505 с.
- 14.Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. Т.1. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. – 914 с.
- 15.Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 392 с.
- 16.Вредные химические вещества: Справочное издание / Под редакцией В.А. Филова и др. – Л.: Химия, 1990. – 464 с.
- 17.Очистка и рекуперация промышленных выбросов / Под редакцией В.Ф. Максимова, И.В. Вольфа. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 640 с.
- 18.Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений / Под редакцией И.П. Мухленова, О.С. Ковалева. – М.: Химия, 1987. – 208 с.
- 19.Очистка воздуха от пыли на горнорудных предприятиях / Г.А. Жовтуха, В.И. Стуканов, А.П. Янов, Н.М. Сердюк. – К.: Техніка, 1977. – 150 с.
- 20.Вилесов Н.Г., Большунов В.Г. Утилизация промышленных сернистых газов. – К.: Наукова думка, 1990. – 136 с.
- 21.Макаров В.В. Основи захисту повітряного басейну: Посібник. – Севастополь: Видавництво СевНТУ, 2003. – 282 с.
- 22.Денисов С.И. Улавливание и утилизация пылей и газов: Учебное пособие. – М.: Металлургия, 1991. – 320 с.
- 23.Защита биосферы от промышленных выбросов. Основы проектирования технологических процессов / А.И. Родионов, Ю.П. Кузнецов, Г.С. Соловьев. – М.: Химия, КолосС, 2005. – 392 с.