

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ЗАХИСТ ПОВІТРЯНОГО БАСЕЙНУ:
робоча програма, методичні вказівки та
індивідуальні завдання для студентів спеціальності
101 – Екологія (бакалаврський рівень)

Друкується за Планом видань навчальної та методичної літератури,
затвердженим Вченою радою УДУНТ
Протокол № 1 від 24.01.2022

Дніпро 2022

УДК 502.7(075.8)

Захист повітряного басейну: робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання для студентів спеціальності 101 – Екологія (бакалаврський рівень) / укладачі: А. Г. Мешкова, М. В. Сухарева, О. В. Саввін, С. Є. Суліменко – Дніпро : Український державний університет науки і технологій, 2021. – 42 с.

Викладено мету та завдання вивчення дисципліни, її зміст, методичні вказівки до виконання індивідуального завдання. Наведено варіанти індивідуального завдання, перелік теоретичних питань для підготовки до контрольних заходів та виконання індивідуального завдання, перелік рекомендованої літератури.

Призначена для студентів спеціальностей 101 – Екологія та 183 – Технології захисту навколишнього середовища (бакалаврський рівень) заочної форми навчання.

Укладачі: А. Г. Мешкова, ст. викладач,
М. В. Сухарева, ст. викладач,
О. В. Саввін, канд. техн. наук, доц.,
С. Є. Суліменко, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск О. О. Єрємін, д-р техн. наук, проф.

Рецензент С. В. Білодієнко, д-р техн. наук, проф.

Формат 60×84 1/16. Облік.-вид. арк. 1,23. Умов. друк. арк. 2,44.

Замовлення № 140

Український державний університет науки і технологій

49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2

Редакційно-видавничий відділ УДУНТ

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	4
1	РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ.....	4
1.1	Мета та завдання.....	4
1.2	Розподіл навчальних годин.....	6
1.3	Зміст дисципліни.....	6
1.4	Практичні заняття.....	8
2	МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ.....	8
2.1	Загальні вимоги.....	8
2.2	Варіанти індивідуального завдання.....	9
2.3	Теоретичні питання для виконання індивідуального завдання та підготовки до контрольних заходів.....	9
2.4	Методичні вказівки до розрахункової частини індивідуального завдання.....	11
	Задача 1 (Розрахунок циклонів).....	11
	Задача 2 (Розрахунок фільтрів для очистки викидів від пилу).....	18
	Задача 3 (Розрахунок електрофільтра).....	23
	Задача 4 (Розрахунок скрубера і форсунки).....	27
	Задача 5 (Розрахунок адсорберів).....	33
	РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	40
	Додаток А.....	41

ВСТУП

Робоча програма дисципліни «Захист повітряного басейну» складена на підставі типової програми для вищих навчальних закладів та враховуючи металургійний профіль навчального закладу.

Навчальна дисципліна «Захист повітряного басейну» є нормативною і входить до циклу дисциплін професійної (фахової) підготовки.

Дисципліна вивчається на останньому курсі підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» спеціальності 101 – Екологія і базується на знаннях з інших дисциплін відповідної освітньо-професійної програми, що їй передують. Набуті знання студенти використовують при виконанні випускної кваліфікаційної роботи та в подальшій професійній діяльності.

З дисципліни «Захист повітряного басейну» студентам читаються настановні та оглядові лекції, проводяться індивідуальні та групові консультації та практичні роботи.

Основна форма навчальної роботи студентів – самостійне вивчення матеріалу дисципліни за рекомендованими підручниками, навчальними посібниками та іншими літературними джерелами у послідовності, наведеній у робочій програмі. При вивченні матеріалу рекомендується вести конспект для систематизації та закріплення знань. Конспект не повинен бути об'ємним, але повинен бути змістовним.

Згідно з навчальним планом дисципліни передбачається виконання індивідуального завдання, практичних робіт та іспит. Після захисту індивідуального завдання та практичних робіт студент складає письмово іспит з дисципліни.

1 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

1.1 Мета та завдання

Мета вивчення дисципліни – засвоєння знань та придбання навичок, які необхідні для проектування технологічних схем очищення промислових викидів від шкідливих речовин, раціонального вибору методів та апаратів для очищення. Дисципліна передбачає вивчення теоретичних основ методів очищення викидів в повітряний басейн, технологічні схеми, методики

розрахунків технологічних та конструктивних параметрів обладнання для очищення.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні *знати*:

- сутність сучасного етапу розвитку санітарної охорони повітряного басейну;
- загальні заходи щодо санітарної охорони атмосферного повітря;
- теоретичні основи методів очищення промислових викидів;
- види апаратів, з яких складаються технологічні схеми очищення викидів;
- засоби інтенсифікації процесів очищення викидів в повітряний басейн;

вміти:

- проєктувати технологічну схему очищення промислових викидів в залежності від їх складу та параметрів;
- обирати раціональні, в конкретних умовах, методи очищення викидів;
- визначати кількість ступенів очищення;
- розраховувати матеріальний баланс та сумарну ефективність процесу очищення на основі технологічної схеми;
- обирати апарати для очищення викидів, враховуючи існуючі на виробництві умови;
- обирати реагенти для очищення та розраховувати їх кількість;
- визначати, розраховувати чи обирати технологічні параметри для конкретного методу очищення викидів;
- визначати основні розміри апаратів для очищення;
- будувати у комп'ютерних програмах технологічні схеми очищення викидів.

Критерії успішності – отримання позитивної оцінки під час захисту індивідуального завдання та при складанні письмового іспиту.

1.2 Розподіл навчальних годин

	Усього	Семестри
		II
Усього годин за навчальним планом	90	90
У тому числі:		
Аудиторні заняття	12	12
- лекції	8	8
- лабораторні заняття	-	-
- практичні заняття	4	4
Самостійна робота	78	78
Підсумковий контроль	Іспит	Іспит

1.3 Зміст дисципліни

Тема 1. Поняття про захист повітряного басейну. Заходи щодо зменшення викидів шкідливих речовин у повітряний басейн. Класифікація газоочисних апаратів

Поняття про захист повітряного басейну. Критерії встановлення ГДК та її види для атмосферного повітря. Планувальні заходи зі зниження приземних концентрацій шкідливих речовин. Технологічні заходи щодо зниження шкідливих викидів в атмосферу. Заходи щодо придушення пило газовиділення. Уловлення неорганізованих пило газовиділень. Класифікація газоочисних апаратів.

Тема 2. Очистка викидів в повітряний басейн в камерах та інерційних пиловловлювачах

Очистка газового потоку в осаджуваних камерах. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми. Жалюзійні пиловловлювачі. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми. Радіальні пиловловлювачі. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.

Тема 3. Відцентрові пиловловлювачі

Циклони. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми. Типи циклонів. Правила їх експлуатації. Батарейні циклони. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми. Вихрові пиловловлювачі. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми. Ротаційні пиловловлювачі. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.

Тема 4. Очистка викидів у повітряний басейн фільтруванням

Загальні відомості про процес фільтрування. Характеристики пористої перетинки. Механізми процесу фільтрування. Характеристика волокнистих фільтрів. Характеристика тканинних фільтрів. Зернисті та металокерамічні фільтри. Фільтри-тумановловлювачі.

Тема 5. Фізичні основи мокрої очистки газів

Механізм мокрої очистки газів. Форсункові скрубери. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми. Скрубери Вентурі. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми. Динамічні газопромивачі. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми. Мокрі апарати відцентрової дії. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми. Мокрі апарати ударно-інерційної дії. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми. Тарілчасті газоочисні апарати. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.

Тема 6. Електричне очищення газів

Іонізація газів та коронний розряд. Фізичні основи електричної очистки газів. Електрофільтри та особливості конструкції їх елементів. Однозонні уніфіковані сухі електрофільтри. Мокрі трубчасті однозонні електрофільтри. Двохзонні електрофільтри. Вплив різних чинників на роботу електрофільтрів. Вимоги до експлуатації електрофільтрів.

Тема 7. Абсорбція як метод уловлювання газових домішок

Основи процесу фізичної абсорбції газів. Матеріальний баланс і основні рівняння процесу абсорбції. Коефіцієнт абсорбції. Абсорбційні апарати та установки. Основи розрахунку абсорберів.

Тема 8. Адсорбція та іонообмінні методи очистки викидів від газових домішок

Основи процесу адсорбції газів. Види та характеристики адсорбентів. Адсорбери з нерухомим шаром поглинача. Адсорбери з киплячим шаром поглинача. Іонообмінна очистка газів.

1.4 Практичні заняття

1. Розрахунки відцентрових апаратів для очистки викидів від пилу.
2. Розрахунок фільтрів для очистки викидів від пилу.
3. Розрахунки різних типів електрофільтрів.
4. Розрахунки апаратів для мокрого очищення викидів.
5. Розрахунок адсорберів.

2 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ

2.1 Загальні вимоги

Індивідуальне завдання студент виконує відповідно до свого варіанта. Варіант індивідуального завдання вибирають за сумою двох останніх цифр номера залікової книжки (наприклад, № 458037, тоді варіант індивідуального завдання: $3 + 7 = 10$).

До складу індивідуального завдання входить: титульний аркуш, зміст, теоретична частина, яка складається з трьох теоретичних питань з різних розділів дисципліни, розрахункова частина (5 задач), перелік посилань на літературні джерела. На титульному аркуші обов'язково вказують варіант; у разі його відсутності індивідуальне завдання повертається студенту без перевірки.

Індивідуальне завдання виконують у надрукованому вигляді на аркушах формату А4, шрифт – Times New Roman, розмір 14, інтервал 1,5, абзац 1,25, вирівнювання тексту за шириною сторінки. Обсяг відповіді залежить від питання. Відповіді повинні бути чіткими, повними, з посиланням на літературні джерела, пояснюватися рисунками, схемами, формулами, хімічними реакціями. Нумерація рисунків, формул, таблиць здійснюється згідно з номером питання та порядковим номером рисунка чи формули. Наприклад, Рисунок 1.5 – п'ятий рисунок у відповіді на перше питання; формула (4.1) – перша формула у відповіді на четверте питання. Попереду рисунка, формули, таблиці повинно бути спочатку посилання (наприклад: «На рисунку 2.3 представлено принцип роботи циклона»), далі виконується відступ в одну строку, а після формули, підпису під рисунком, закінчення таблиці – теж відступ в одну строку. Рисунок

або таблиця наводяться одразу після посилання на них. Назва таблиці пишеться з абзацу, назва та підпис під рисунком – посередині листа.

В кінці індивідуального завдання, після переліку використаної літератури, слід поставити дату виконання та підпис.

2.2 Варіанти індивідуального завдання

№№ вар.	№№ питань	№№ задач	№№ вар.	№№ питань	№№ задач	№№ вар.	№№ питань	№№ задач
01	1,19,37	1,2,5	7	7,25,43	1,2,5	13	13,31,49	1,2,5
02	2,20,38	1,3,5	8	8,26,44	1,3,5	14	14,32,50	1,3,5
03	3,21,39	1,4,5	9	9,27,45	1,4,5	15	16,33,51	1,4,5
04	4,22,40	1,2,5	10	10,28,46	1,2,5	16	16,34,52	1,2,5,
05	5,23,41	1,3,5,	11	11,29,47	1,3,5	17	17,35,53	1,3,5
06	6,24,42	1,4,5	12	12,30,48	1,4,5	18	18,36,54	1,4,5

2.3 Теоретичні питання для виконання індивідуального завдання та підготовки до контрольних заходів

1. Поняття про захист повітряного басейну.
2. Критерії встановлення ГДК та її види для атмосферного повітря.
3. Планувальні заходи зі зниження приземних концентрацій шкідливих речовин.
4. Технологічні заходи щодо зниження шкідливих викидів в атмосферу.
5. Заходи щодо подавлення пило- та газовиділень.
6. Уловлення неорганізованих пило- та газовиділень.
7. Класифікація газоочисних апаратів.
8. Очистка газового потоку в осаджуваних камерах. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.
9. Жалюзійні пиловловлювачі. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.
10. Радіальні пиловловлювачі. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.
11. Циклони. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.
12. Типи циклонів. Правила їх експлуатації.
13. Батарейні циклони. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.
14. Вихрові пиловловлювачі. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.

15. Ротаційні пиловловлювачі. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.
16. Очистка газів фільтруванням. Її механізм. Фільтруюча перетинка.
17. Характеристика волокнистих фільтрів.
18. Характеристика тканинних фільтрів.
19. Зернисті та металокерамічні фільтри.
20. Фільтри-тумановловлювачі.
21. Механізм мокрої очистки газів.
22. Форсуночні скрубери. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.
23. Скрубери Вентурі. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.
24. Динамічні газопромивачі. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.
25. Мокрі апарати відцентрової дії. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.
26. Мокрі апарати ударно-інерційної дії. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.
27. Тарілчасті газоочисні апарати. Принцип дії. Формули для розрахунку. Схеми.
28. Електрофільтри та особливості конструкції їх елементів.
29. Однозонні уніфіковані сухі електрофільтри.
30. Мокрі трубчасті однозонні електрофільтри.
31. Двохзонні електрофільтри.
32. Вплив різних чинників на роботу електрофільтрів.
33. Вимоги до експлуатації електрофільтрів.
34. Основи процесу фізичної абсорбції газів.
35. Абсорбційні апарати та установки.
36. Основи розрахунку абсорберів.
37. Основи процесу адсорбції газів.
38. Види та характеристики адсорбентів.
39. Адсорбери з нерухомим шаром поглинача.
40. Адсорбери з киплячим шаром поглинача.
41. Іонообмінна очистка газів.
42. Знепилювання газів агломераційних машин.
43. Очистка газів при виробництві котунів.
44. Очистка викидів доменного виробництва.
45. Очистка викидів при грануляції шлаку.
46. Очистка викидів міксерного відділення.

47. Установки очистки конвертерних газів з повним допалюванням CO.
48. Установки очистки конвертерних газів з частковим допалюванням CO.
49. Установки очистки конвертерних газів без допалювання CO.
50. Характеристика методів очистки газів електросталеплавильних печей.
51. Очистка газів закритих феросплавних печей.
52. Очистка газів відкритих феросплавних печей.
53. Очистка викидів травильних відділень.
54. Очистка викидів машин вогневої зачистки металу.

2.4 Методичні вказівки до розрахункової частини індивідуального завдання

Задача 1 (Розрахунок циклонів)

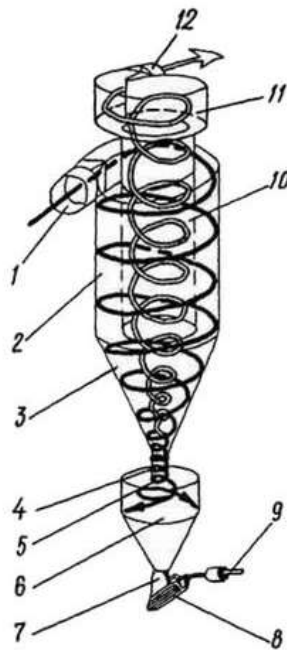
Вступна частина

Апаратами сухого механічного очищення запилених газів (викидів) є пилоосаджувальні камери, інерційні та ротаційні пиловловлювачі, циклони, вихрові пиловловлювачі, пористі фільтри.

Циклони є найбільш поширеними апаратами для сухого пиловловлення. Принцип роботи – осідання частинок під впливом відцентрових сил та сил тяжіння, представлений на рисунку 2.1.

При введенні потоку через тангенціальний патрубок 1 частинки відштовхуються до внутрішньої стінки корпусу 3 і, втрачаючи швидкість, випадають у бункер 4, звідки виводяться через вихідний патрубок 5. Очищений газ виводиться через патрубок 2. Відцентровий ефект сильніше виявляється у великих часток, тому циклони призначені для грубої механічної очистки викидів від часток великого і важкого пилу, наприклад, для уловлювання золи, що утворюється при спалюванні палива в котлах теплових станцій.

У промисловості використовують циклони, що розраховані на швидкість потоку від 5 до 20 м/с. Ефективність очистки від пилу за допомогою циклонів становить 98% частинок розмірами 30–40 мкм; 80% для часток розміром 10 мкм; 60% для часток розміром 4–5 мкм. Продуктивність циклонів лежить у діапазоні від кількох сотень до десятків тисяч м³ на годину.



1 – вхідний патрубок; 2 – корпус циклона; 3 – конус; 4 – патрубок, що відводить пил; 5 – отвір, що відводить пил; 6 – пилозбірний бункер; 7 – пилопускний патрубок; 8 – клапан пилового затвору; 9 – важіль клапану; 10 – труба; 11 – равлик; 12 – патрубок для відводу очищеного газу.

Рисунок 2.1 – Циклонний пиловловлювач

Перевагою циклонів є простота конструкції, відсутність частин, що рухаються, і невеликі розміри. Недоліками є витрати енергії на обертання потоку та абразивне зношування частин апарата пилом.

Для більшої ефективності використовують кілька циклонів невеликого діаметра, зібрані у секції батареї – батарейні циклони. Циклони з'єднуються між собою патрубками і збірними камерами. Для нормальної роботи циклону необхідна герметичність бункера для виключення виносу пилу з потоком через підсмоктування зовнішнього повітря.

Конструктивно циклони бувають циліндричні та конічні. Циліндричні циклони типу ЦН-15 (15 – це кут нахилу вхідного патрубку: $\alpha = 15^\circ$) виготовляються з вуглецевої або низьколегованої сталі. Вони призначені для попереднього очищення викидів від пилу перед фільтрами та електрофільтрами. Конічні циклони типу СК призначені для очищення викидів від сажі, мають підвищену ефективність через більший гідравлічний опір.

Бункери циклонів мають циліндричну форму діаметром $1,5 D$ для циліндричних та $1,2 D$ для конічних циклонів. Висота циліндричної частини бункера становить $0,8 D$.

Для розрахунку циклону необхідно мати наступні вихідні дані: обсяг газу, що очищається Q , $\text{м}^3/\text{с}$; щільність газу в робочих умовах ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$; в'язкість при робочій температурі μ , $\text{Па}\cdot\text{с}$; дисперсний склад пилу d_{50} ; вхідну концентрацію пилу $c_{\text{вх}}$, $\text{г}/\text{м}^3$; потрібну ефективність очищення ζ .

Розрахунок циклонів ведуть шляхом послідовних наближень. Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	Тип циклону	Q , $\text{м}^3/\text{с}$	$c_{\text{вх}}$, $\text{г}/\text{м}^3$	ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$	$\mu \cdot 10^6$, $\text{Па}\cdot\text{с}$	ζ	$\rho_{\text{ч}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$
1	ЦН-11	10	40	1,34	22,2	0,95	1930
2	ЦН-11	11	120	1,35	22,1	0,65	2230
3	ЦН-15	12	80	1,36	22	0,75	1650
4	ЦН-15	12,5	85	1,36	22,1	0,7	1700
5	ЦН-24	14	20	1,38	21,8	0,9	1750
6	ЦН-24	15	25	1,39	21,7	0,85	1900
7	СДК-ЦН-33	8	150	1,33	21,6	0,7	2000
8	СК-ЦН-34	5	80	1,32	21,5	0,75	2050
9	СК-ЦН-34м	1	40	1,31	21,4	0,7	2200
10	ЦН-11	10,5	45	1,34	22,1	0,9	1950
11	ЦН-11	11,5	125	1,35	21,5	0,6	2240
12	ЦН-15	13	10	1,37	21,9	0,95	1700
13	ЦН-15	13,5	15	1,37	22	0,9	1650
14	ЦН-24	14,5	35	1,38	21,7	0,95	1800
15	ЦН-24	15,5	40	1,39	21,6	0,8	1950
16	СДК-ЦН-33	7	140	1,33	21,5	0,65	2130
17	СК-ЦН-34	6	75	1,32	21,4	0,75	2100
18	СК-ЦН-34м	1	45	1,31	21,3	0,7	2150

Методика розрахунку

Визначають оптимальну швидкість руху газу $w_{\text{опт}}$ в залежності від типу циклона (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Оптимальна швидкість руху газу $w_{\text{опт}}$ в залежності від типу циклона

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34м
$w_{\text{опт}}$, м/с	4,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0

Розраховують діаметр циклона:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi * w_{\text{опт}}}} \quad (2.1)$$

Отримане значення необхідно округлити до найближчого типового значення. Прийнятий наступний ряд внутрішнього діаметра циклонів D , мм: 150; 200; 300; 400; 450; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1200; 1400; 1600; 1800; 2000; 2400; 3000. Якщо значення D перевищує максимальне типове значення, то необхідно використовувати два чи більше паралельно встановлених циклонів.

Розраховують дійсну швидкість потоку в циклоні:

$$w = \frac{4Q}{\pi * N * D^2}, \quad (2.2)$$

де N – число циклонів; значення w не повинно відхилитися від $w_{\text{опт}}$ більш, ніж на 15%.

Розраховують коефіцієнт гідравлічного опору:

$$R = k_1 * k_2 * R_{500}, \quad (2.3)$$

де k_1 і k_2 – коефіцієнти, які залежать від D , $c_{\text{вх}}$ і типу циклона (табл. 2.3 та 2.4);

R_{500} – коефіцієнт гідравлічного опору при $D = 500$ мм (табл. 2.5).

Таблиця 2.3 – Значення k_1 для різних D і типів циклонів

Тип циклона	D, мм				
	150	200	300	450	>500
ЦН-11	0,94	0,95	0,96	0,99	1,0
ЦН-15, ЦН-24	0,85	0,9	0,93	1,0	1,0
СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34 і 34м	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблиця 2.4 – Значення k_2 для різних $c_{вх}$ і типів циклонів

Тип циклона	$c_{вх}, \Gamma/\text{M}^3$						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,9	0,87	-
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,9	0,87	0,86
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,9	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	0,9
СК-ЦН-34м	1	0,99	0,97	0,95	-	-	-

Таблиця 2.5 – Значення R_{500} в залежності від типів циклонів

Тип циклона	Викид		Тип циклона	Викид	
	В атмосферу	В гідр. мережу		В атмосферу	В гідр. мережу
ЦН-11	245	250	СДК-ЦН-33	520	60
ЦН-15	155	163	СК-ЦН-34	1050	1150
ЦН-24	75	80	СК-ЦН-34м	-	2000

Розраховують значення гідравлічного опору:

$$\Delta P = P_{вх} - P_{вих} - \frac{R \cdot \rho_{г} \cdot w^2}{2}. \quad (2.4)$$

Визначають ефективність очистки:

$$\zeta = 0,5 \cdot (1 + \Phi(x)), \quad (2.5)$$

де $\Phi(x)$ – функція параметра x (довідкові дані функції див. Додаток А):

$$x = \log \left(\frac{d_{50}}{d_{r50}} \right). \quad (2.6)$$

Значення d_{50} визначають за формулою:

$$d_{50} = d_{T50} \sqrt{\frac{D \rho_{чТ} \mu w_T}{D_T \rho_{ч} \mu_T w}}, \quad (2.7)$$

де $\rho_{ч}$ – щільність часток, кг/м³; μ – в'язкість, Па*с; w – швидкість потоку, м/с; $D_T = 600$ мм, $\rho_{чТ} = 1930$ кг/м³; $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па*с; $w_T = 3,5$ м/с (індекс T позначає типові значення параметра), значення d_{T50} наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Значення параметра d_{T50} в залежності від типу циклона

Тип циклона	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
d_{T50}	8,5	4,5	3,65	2,31	1,95	1,3

Здійснюють вибір циклона. Якщо розрахункове значення менше ніж те, що вимагається, тоді необхідно обрати інший циклон з більшим гідравлічним опором R .

Для цього можливим є використання формули:

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{1-\zeta_1}{1-\zeta_2} \right)^2 \frac{w_1 D_1}{w_2 D_2}, \quad (2.8)$$

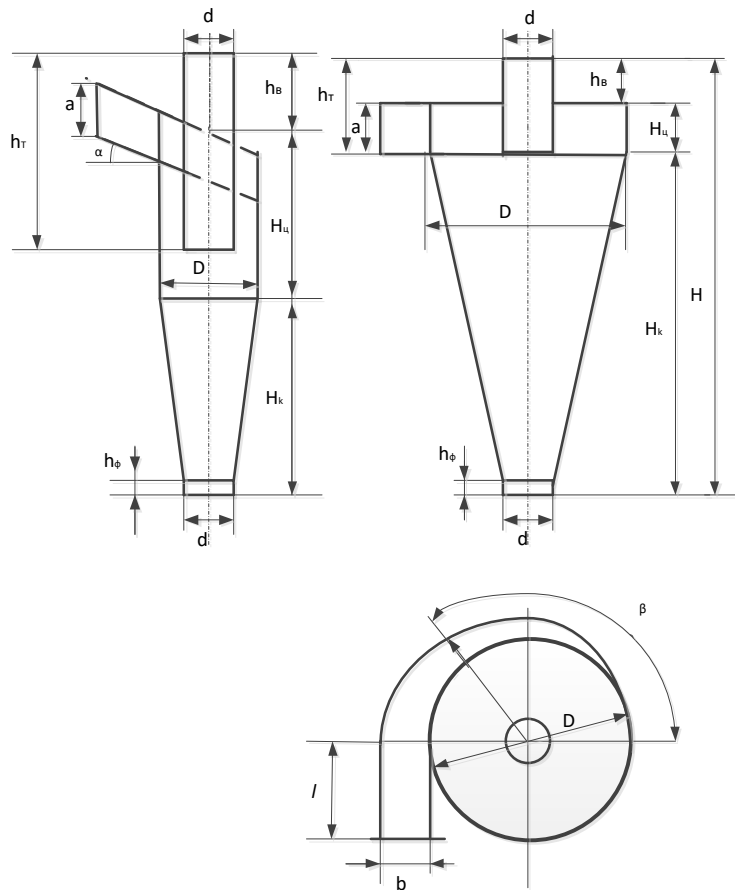
де індекси 1 і 2 відповідають двом різним циклонам.

Розраховують конструктивні розміри циклона в мм (рисунок 2.2, таблиця 2.7) згідно з діаметром D в мм обраного циклона.

$$y = k \cdot D, \quad (2.9)$$

де y – конкретний параметр циклона;

k – коефіцієнт пропорційності (таблиця 2.7).



а) конічний; б) циліндричний; в) вид зверху (равлик).

Рисунок 2.2 – Схеми циклонів

Таблиця 2.7 – Значення коефіцієнта пропорційності k в залежності від типу циклона

Тип циклона	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34м
Діаметр вихідної труби d	0,59			0,334	0,34	0,22
Діаметр пило випускного отвору d_1	0,3-0,4			0,334	0,23	0,18
Ширина вхідного патрубку b	0,2			0,264	0,214	0,18
Довжина вхідного патрубку l	0,6					
Висота вхідного патрубку a	0,48	0,66	1,11	0,535	0,515	0,4
Висота вихідної труби h_T	1,56	1,74	2,11	0,535	0,515	0,4
Висота зовнішньої частини вихідного патрубку h_b	0,3	0,3	0,4	0,2-0,3		
Висота циліндричної частини $H_{ц}$	2,06	2,06	2,11	0,535	0,515	0,4
Висота конуса H_k	2	2	1,75	3	2,11	2,6
Висота встановлення фланцю $h_{фл}$	0,1					
Загальна висота циклона H	4,38	4,56	4,26	3,835	2,925	3,3

Далі необхідно накреслити схему циклона в масштабі згідно з розрахованими розмірами.

Задача 2 (Розрахунок фільтрів для очистки викидів від пилу)

Вступна частина

Фільтри широко використовуються для тонкого очищення промислових викидів. Процес фільтрації заснований на затриманні частинок домішок у пористих перетинках під час руху дисперсних систем через них. Фільтри застосовуються для очищення викидів від пилу (з концентрацією до 150 мг/м^3), очищення повітря, що подається в приміщення (кондиціонування), очищення рідин від домішок та ін. Ефективність очищення фільтрами залежить від розміру частинок ($d_{ч}$) та їх швидкості (v), розміру пор ($d_{п}$), стану поверхні фільтроелемента та параметрів газового потоку.

Фільтри можна класифікувати за типом перетинки, конструкції та призначення. У фільтрах застосовуються перетинки різних типів:

а) напівжорсткі пористі матеріали (в'язані сітки, пресовані спіралі та стружка;

б) жорсткі пористі матеріали (пориста кераміка та метали);

в) гнучкі пористі матеріали (тканини, повсть, губчаста гума);

г) зернистий шар (пісок).

Фільтри 1 і 2 групи (рис. 2.3) представляють собою корпус розділений пористою перетинкою.

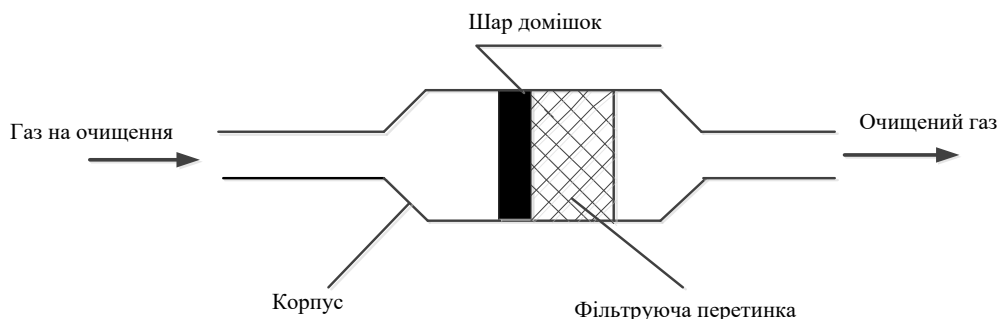


Рисунок 2.3 – Схема фільтра

Затримані частинки забруднювача на поверхні перетинки утворюють шар і стають частиною фільтрувальної перетинки. Затримування частинок відбувається внаслідок ефекту торкання, дифузійного, інерційного та гравітаційного процесів. Невдовзі виникає необхідність видалення осаду, тобто, регенерації фільтра, оскільки у міру накопичення частинок пористість зменшується, а опір збільшується. З фільтрів третього типу найбільш уживані тканинні рукавні фільтри. У корпусі фільтра встановлюється необхідна кількість рукавів, куди подається запилене повітря. Повітря проникає через тканину, а частинки пилу затримуються. Через певний час рукави продувають і струшують. Ефективність очищення досягає 0,99 для часток розміром більше 0,5 мкм.

Процес фільтрації характеризується такими параметрами: ефективність очищення; тонкість очищення; пористість; швидкість фільтрації; пропускна спроможність; гідравлічний або аеродинамічний опір.

Абсолютна тонкість очищення – це максимальний розмір частинок, що пройшли через фільтр. Номінальна тонкість очищення – це розмір частинок, за якими фракційна ефективність очищення дорівнює 0,97. Переважний ряд: 1; 2; 5; 10; 16; 25 мкм та ін.

Пористістю фільтруючого елемента називається відношення обсягу порожнин (V_p) до повного обсягу фільтруючого елемента (V):

$$\Pi = V_p/V. \quad (2.10)$$

Швидкість фільтрації – це відношення об'ємної витрати Q ($\text{м}^3/\text{с}$) речовини, що очищається, до площі фільтруючої поверхні F (м^2):

$$w = Q/F, \text{ м/с}. \quad (2.11)$$

Питома масова пропускна здатність фільтра:

$$G = w \cdot \rho, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (2.12)$$

де ρ – щільність речовини, що очищається, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Гідравлічний (аеродинамічний) опір фільтра – це різниця тисків на вході та виході фільтра:

$$\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вих}}. \quad (2.13)$$

При проектуванні призначається початковий та кінцевий опір фільтра. При досягненні кінцевого опору процес фільтрації припиняється та фільтр піддається регенерації.

Розрахувати параметри пористого металевого фільтра для очищення повітря від пилу глинозему при нормальному атмосферному тиску ($P_{\text{атм}} = 100$ кПа) та температурі повітря 20 °С. Початковий опір фільтра $\Delta P_{\text{поч}} = 10$ кПа. Щільність частинок забруднювача $\rho_{\text{ч}} = 3,9 \cdot 10^3$ кг/м³. Пористість осаду $\Pi_0 = 0,5$. В'язкість повітря при 20 °С: $\mu = 18 \cdot 10^{-6}$ Па*с.

Інші вихідні дані представлені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Вихідні дані для розрахунку металевого фільтра

№ вар.	Q, м ³ /год.	c _{вх} , мг/м ³	d _{то абс} , мкм	ΔP _{кон} , кПа	τ, год	Пористий матеріал	Форма часток	Π	h, мм
1	150	5	5	20	50	Бронза	Сфера	0,33	1
2	160	10	4	25	45	Ст50ХГ	Сфера	0,25	0,7
3	120	15	3	15	40	Ст50ХГ	80 % Сф	0,3	0,5
4	140	20	10	16	35	Ст50ХГ	20 % Сф	0,28	2
5	100	25	16	17	30	Ст50ХГ	Пелюстки	0,26	3
6	130	30	25	18	25	Ст50ХГ	Пелюстки	0,24	4
7	170	35	10	19	20	Залізо	Тарілчаста	0,38	2
8	110	40	16	20	15	Залізо	Тарілчаста	0,42	3
9	180	45	25	21	10	Бронза	Сфера	0,35	4
10	155	6	5	22	48	Бронза	Сфера	0,32	0,9
11	165	12	3	23	43	Ст50ХГ	Сфера	0,24	0,7
12	124	17	7	24	38	Ст50ХГ	80 % Сф	0,29	0,5
13	147	22	14	25	32	Ст50ХГ	20 % Сф	0,27	2
14	107	26	16	23	28	Ст50ХГ	Пелюстки	0,25	3
15	135	32	23	15	23	Ст50ХГ	Пелюстки	0,23	4
16	175	37	12	16	17	Залізо	Тарілчаста	0,37	2
17	115	43	17	24	16	Залізо	Тарілчаста	0,41	3
18	175	47	24	15	15	Бронза	Сфера	0,26	4

Методика розрахунку

Обирають матеріал для виготовлення фільтруючого елемента, виходячи з умови експлуатації фільтра, корозійних характеристик матеріалу та економічних міркувань.

Визначають максимальний розмір пор:

$$d_{\text{п макс}} = 3d_{\text{то абс}}, \quad (2.14)$$

де $d_{\text{то абс}}$ – абсолютна тонкість очистки, мкм.

Визначають середній розмір пор:

$$d_{\text{п ср}} = 1,25 * d_{\text{п макс}} * \Pi^{0,3}, \text{ мкм} \quad (2.15)$$

де Π – пористість фільтруючого елемента.

Визначають розмір часток порошку для виготовлення фільтруючого елемента:

$$d_{\text{ч ср}} = d_{\text{п ср}} / \Pi^2, \text{ мкм.} \quad (2.16)$$

Обирають товщину фільтруючого елемента h за технологічними вимогами і вимогами міцності в межах 0,25–5 мм.

Визначають швидкість потоку в порах:

$$w_n = \frac{\Delta P_{\text{поч}} * d_{\text{п.ср.}}^2}{208 * h * \mu} \quad (2.17)$$

де $\Delta P_{\text{поч}}$ – початковий опір фільтру, Па;

μ – в'язкість речовини що фільтрується, Па*с.

Визначають площу фільтрації:

$$F = \frac{Q}{w_n * \Pi}, \text{ м}^2 \quad (2.18)$$

Визначають кінцевий опір фільтра:

$$\Delta P_{\text{кін.р.}} = \frac{\Delta P_{\text{поч}}}{h} \left[(1 - e^{-X}) * \left(\frac{e^Y - 1}{A * B} \right) + h \right], \text{ Па}, \quad (2.19)$$

де $X = A * V * h$; $Y = A * q_{\text{вх}} * \tau$; $q_{\text{вх}} = C_{\text{вх}} / \rho_{\text{ч}}$; $B = \frac{(1 - \Pi_0) * \Pi}{w_{\text{ф}}}$; $w_{\text{ф}} = \Pi * w_{\text{п}}$, м/с;

A – дослідний коефіцієнт, що залежить від розмірів частинок та розміру пор: для очищення газів $A = 5,25 * 10^3 \text{ с}^{-1}$; для очистки рідин $A = 10 \text{ с}^{-1}$;

τ – час роботи фільтра, с;

$q_{\text{вх}}$ – об'ємний вміст твердих частинок у речовині, що фільтрується, на вході фільтра;

$C_{\text{вх}}$ – концентрація забруднювача, кг/м³;

$\rho_{\text{ч}}$ – щільність частинок забруднювача, кг/м³;

$w_{\text{ф}}$ – швидкість фільтрації, м/с;

Π_0 – пористість осаду.

Визначають максимально допустимий час роботи фільтра (якщо $\Delta P_{\text{кін.р.}}$ відрізняється від заданого $\Delta P_{\text{кін}}$):

$$\tau_{\text{м}} = \frac{1}{A * q_{\text{вх}}} \ln \left[1 + \frac{\Delta P_{\text{кін.р.}}}{\Delta P_{\text{поч}}} * \frac{X}{1 - e^{-X}} \right], \text{ с}. \quad (2.20)$$

Визначають ефективність очистки:

$$\eta = \frac{q_{\text{вх}} - q_{\text{вих}}}{q_{\text{вх}}} * 100\%, \quad (2.21)$$

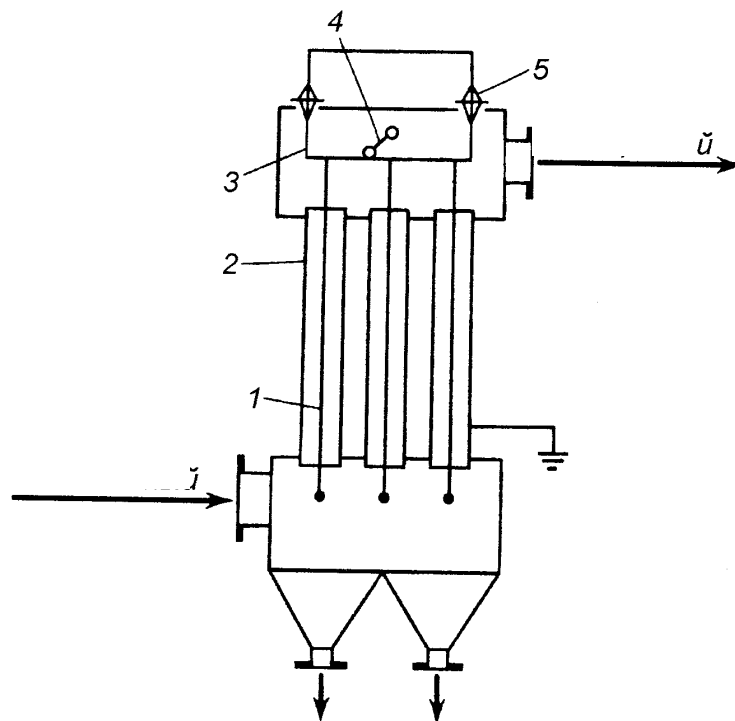
де $q_{\text{вих}} = \frac{1}{A * \tau_{\text{м}}} * \ln \left[\frac{e^Z + e^X - 1}{e^X} \right]$; $Z = A * q_{\text{вх}} * \tau_{\text{м}}$.

Якщо кінцеві дані, наприклад, ефективність очищення не задовольняють вимогам, розрахунок проводять знову, змінивши розміри фільтруючого елемента або структурні властивості його матеріалу.

Задача 3 (Розрахунок електрофільтра)

Вступна частина

Електрична фільтрація заснована на зарядці зважених частинок і осадженні заряджених частинок на осаджувальних електродах під дією електричних сил. Газ, що містить зважені частинки, проходить через систему, що складається із заземлених осаджувальних електродів і розташованих на деякій відстані електродів, що коронують, до яких підводиться випрямлений електричний струм високої напруги (рис. 2.4).



1 – коронуючі електроди; 2 – осаджувальні електроди; 3 – рама; 4 – пристрої для струшування електродів; 5 – ізолятори

Рисунок 2.4 – Схема трубчастого електрофільтра

При досить великій напрузі, прикладеній до електродів, у поверхні коронуючого електрода виникає інтенсивна ударна іонізація газу, що супроводжується виникненням коронного розряду (корони). Коронний розряд – це явище ударної іонізації газу під дією електронів, що рухаються, або іонів поблизу коронуючого електрода.

Сила струму залежить від числа іонів та напруги між електродами. Сила струму зростає з підвищенням напруги доти, поки всі іони не почнуть рухатися. Після цього настає насичення – всі іони рухаються і підвищення напруги не впливає на силу струму. При деякій критичній напрузі ($U_{кр}$) іони та електрони настільки пришвидшуються, що зіштовхнувшись з молекулами газу, іонізують їх перетворюючи на позитивні іони та електрони. Іони та електрони, які утворилися, пришвидшуються електричним полем та приймають участь в іонізації молекул. Цей процес називається ударною іонізацією газу. Після цього відбувається пробій газу. Зважені частки, поступають у зону між електродами, адсорбують на своїй поверхні іони, отримуючи електричний заряд. Заряджені частинки під дією електричного поля рухаються у бік електрода з протилежним знаком і осідають на коронуючому 1 та осаджувальному 2 електродах (рисунок 2.4). Електрофільтр живиться від джерела високої напруги 3 (20–90 кВ).

Час зарядження частинок вимірюється частками секунди. Швидкість руху частинок залежить від напруженості електричного поля та діаметра частинок.

Електрофільтри бувають трубчасті та пластинчасті, які можуть бути горизонтальні та вертикальні, сухі та мокрі. У трубчастих електрофільтрах в якості осаджувальних електродів використовують труби діаметром 0,25–0,30 м і довжиною 3–5 м. У пластинчастих електрофільтрах в якості осаджувальних електродів використовують пластинки плоских, «с»-подібних та інших форм. В якості коронуючих електродів використовують конструкції з нефіксованими та фіксованими точками розряду.

Важливу роль у процесі осадження пилу на електродах грає електричний опір шару пилу. Пил з питомим опором від 10^6 до 10^{12} Ом*м добре осідає і легко видаляється струшуванням. Пил меншого опору швидко віддає заряд і повертається в потік. Пил з більшим опором розряджається повільно і перешкоджає осадженню нових частинок.

Для забезпечення рівномірності надходження газу на вході електрофільтра встановлюється розподільна сітка. Видалення шару пилу здійснюється струшуючим пристроєм. При цьому пил зсипається в бункер, розташований під електродами. Інтервал між струшуючими імпульсами зазвичай становить близько 3 хвилин.

Ефективність очищення запиленого газу за допомогою електрофільтра визначають за формулою Дейча:

$$\eta = 1 - e^{-v_e * F_{\text{пит}}}, \quad (2.22)$$

де $F_{\text{пит}} = F/Q$ – питома поверхня осаджувальних електродів, с/м;

F – площа осаджувальних електродів, м²;

Q – витрата газу, м³/с.

Електрофільтри характеризуються такими параметрами:

а) активна зона – робоча частина апарата, що утворена міжелектродними проміжками;

б) активний перетин – вільний переріз активної зони для проходження газу;

в) активна висота поля – відстань між коронуючими та осаджувальними електродами;

4) активна довжина поля – протяжність поля в напрямку ходу газу;

5) площа осадження – сумарна поверхня осаджувальних електродів;

б) активна довжина коронуючих електродів – сумарна довжина всіх коронуючих електродів.

Для розрахунку електрофільтра необхідні такі вихідні дані:

- об'ємна витрата газу Q та інші параметри газів, що очищаються;
- концентрація та деякі інші властивості пилу;
- необхідний ступінь очищення газу.

Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Вихідні дані для розрахунку електрофільтра

№ вар.	Тип електро-фільтра	H, R мм	U, кВ	Q, м ³ /с	w _г , м/с	μ, 10 ⁻⁶ Па*с	d, мкм	ε	ζ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	УГ (П)	137,5	35	150	0,7	22,2	30	4	0,98
2	ЕГА (П)	150	40	200	1,5	20,1	10	7,5	0,95
3	ЕГТ (П)	130	30	40	0,9	18,8	2	5	0,9
4	УВ (П)	137,5	35	60	1,2	17,5	1	15	0,88
5	СПМ-8	130	30	7	0,8	19,0	0,4	18	0,85
6	ГМЦ-20-2 (П)	137,5	35	25	1,1	23,0	5	2,2	0,9
7	ДМ-316 (Тр)	115	25	20	1,5	20,0	30	4	0,98
8	ШМК-4,5 (Тр)	110	25	5	1,0	17,8	2,5	5	0,95
9	КТ-9 (Тр)	120	25	8	1,1	18,2	1	15	0,94
10	УГ (П)	137,5	35	150	0,6	20,2	25	4	0,99
11	ЕГА (П)	150	40	200	1,6	21,1	15	7,5	0,96
12	ЕГТ (П)	130	30	40	0,8	18,5	3	5	0,94

Закінчення таблиці 2.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	УВ (П)	137,5	35	60	1,1	17,2	1,5	15	0,91
14	СПМ-8	130	30	7	0,8	19,3	0,8	18	0,89
15	ГМЦ-20-2 (П)	137,5	35	25	1,2	22,0	3	2,2	0,84
16	ДМ-316 (Тр)	115	25	20	1,4	20,5	35	4	0,93
17	ШМК-4,5 (Тр)	110	25	5	0,9	17,0	3	5	0,97
18	КТ-9 (Тр)	120	25	8	1,1	18,0	2	15	0,92

Примітка: А – модифікований; В – вертикальний; Г – горизонтальний; Д – доменний;
 К – кислотний; М – мокрий; П – пластинчастий; С – сажовий; Т – високотемпературний;
 Тр – трубчастий; У – уніфікований; Ц – циліндричний корпус; Ш – шестигранні
 електроди; Е – електрофільтр.

Методика розрахунку

Вибирають конструктивний тип електрофільтра з урахуванням вихідних умов (за варіантом).

Розраховують необхідну площу активного перерізу електрофільтра:

$$S = \frac{Q}{w_{\Gamma}} \quad (2.23)$$

де Q – об'ємна витрата газів, що очищаються, м³/с;

w_{Γ} – швидкість газу, м/с.

Визначають напруженість електричного поля:

$$E = U/H, \text{ В/м}, \quad (2.24)$$

де U – робоча напруга електрофільтра, В;

H – відстань між електродами, м.

Для трубчастих електрофільтрів $H = R$, де R – радіус труби, м.

Визначають швидкість осадження (дрейфу) частинок:

$$w_0 = \frac{\varepsilon_0 * \varepsilon * d * E^2}{(\varepsilon + 2) * \mu}, \text{ м/с}, \quad (2.25)$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 * 10^{-12}$ Ф/м;

ε – відносна діелектрична проникність речовини частинок;

μ – динамічна в'язкість газу, Па*с.

Розраховують необхідну активну довжину електрофільтра:

- трубчастий електрофільтр:

$$L = \frac{R \cdot w_{\Gamma}}{2w_0} \ln \frac{1}{1-\zeta}; \quad (2.26)$$

- пластинчастий електрофільтр:

$$L = \frac{H \cdot w_{\Gamma}}{w_0} \ln \frac{1}{1-\zeta}; \quad (2.27)$$

де ζ – ефективність очистки, яка вимагається.

Очікувана ефективність очистки:

- трубчастий електрофільтр:

$$\zeta = 1 - \exp \left[- \frac{2w_0 * L}{R * w_{\Gamma}} \right]; \quad (2.28)$$

- пластинчастий електрофільтр:

$$\zeta = 1 - \exp \left[- \frac{w_0 * L}{H * w_{\Gamma}} \right]. \quad (2.29)$$

Задача 4 (Розрахунок скрубера і форсунки)

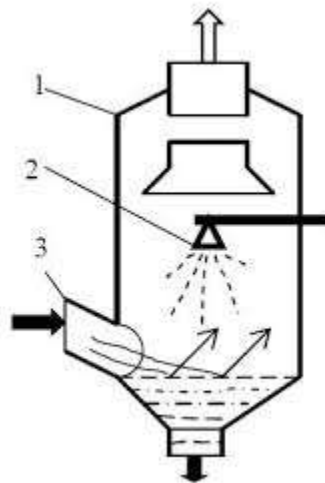
Вступна частина

Мокрі газоочисні апарати застосовують для попереднього очищення та підготовки (кондиціювання) газів, що надходять до газоочисних апаратів інших типів, наприклад, в рукавні фільтри, електрофільтри. Мокрі пиловловлювачі широко застосовуються для очищення повітря від пилу з розміром частинок $d_{\text{ч}} = 0,3\text{--}2$ мкм, а також при високих температурах газу, що очищається. В якості зрошуваної рідини (абсорбенту) найчастіше застосовується вода.

Мокре очищення ефективніше за сухе очищення. Контакт пилу або газу з краплями рідини збільшує ефективність очищення. Принцип дії мокрих пиловловлювачів полягає в осадженні частинок пилу на поверхні крапель і плівки рідини за рахунок сил інерції та броунівського руху. При мокрому очищенні важливу роль відіграє зрошуваність часток рідиною: чим краще зрошуваність – тим ефективніше очищення.

З урахуванням конструктивних особливостей мокрі газоочисні апарати поділяють на такі типи: скрубери Вентурі; форсункові та відцентрові скрубери; ударно-інерційні апарати; барботажно-пінні апарати та ін.

Форсунковий скрубер (рис. 2.5) складається з порожнистої ємності 1, в яку вбудовані форсунки 2. Газ надходить на очистку через патрубок 3 і прямує на поверхню води, де осідають великі частки. Далі потік піднімається вгору на зустріч потоку крапель рідини, що розпорошується через форсунки. Частинки адсорбуються на крапельках і падають вниз. Шлам виводиться через нижню частину апарата. Очищений газ виводиться через верхню частину апарата. Форсунок може бути декілька. Питома витрата води становить $q = 3-6 \text{ л/м}^3$, гідравлічний опір – до $\Delta P = 250 \text{ Па}$ при швидкості потоку $v = 0,7-1,5 \text{ м/с}$.

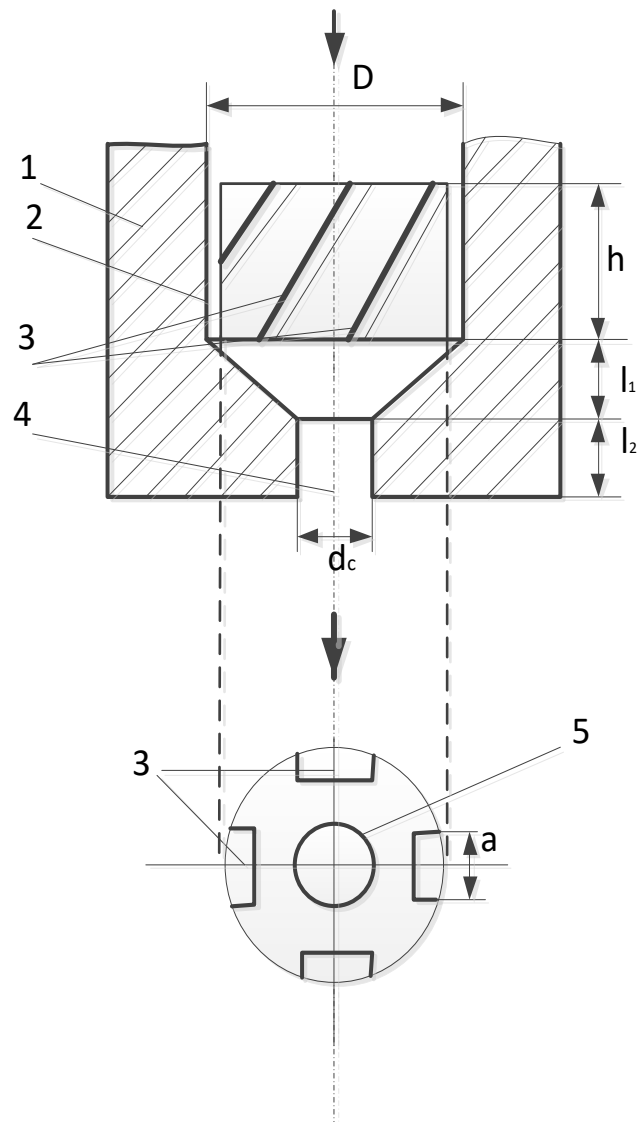


1 – порожниста ємність; 2 – форсунки; 3 – патрубок для підводу газу на очистку

Рисунок 2.5 – Порожнистий форсунковий скрубер

Перетин апарата можна визначити за формулою $S = Q/v$, де Q – об'ємна витрата газу, що очищується, $\text{м}^3/\text{с}$; v – швидкість пропускання потоку, м/с .

Форсунки використовуються для розпилення рідини і розподілу газу в різних апаратах для очистки викидів (апарати мокрої очистки газів, абсорбери, адсорбери та ін.). Форсунки можна розділити на три класи: відцентрові, відцентрово-струменеві, ударно-струменеві. У кожному класі десятки різних конструкцій. У даній задачі розглядається відцентрово-струменева форсунка з вставками, що завихрюють (рис. 2.6).



1 – корпус; 2 – вкладиш; 3 – канали, що завихрюють; 4 – сопло; 5 – центральний канал

Рисунок 2.6 – Відцентрово-струменева форсунка

Для розрахунку скрубера та форсунки необхідні наступні вихідні дані: витрата газу, що очищається $Q_{\text{газ}}$ ($\text{м}^3/\text{с}$); швидкість потоку ($\text{м}/\text{с}$); потрібна продуктивність форсунки Q ($\text{м}^3/\text{с}$); перепад тиску ΔP_p (Па); кореневий кут

факела β (град.); щільність ρ_p (кг/м³); в'язкість μ (Па*с); поверхневий натяг σ , щільність ρ_r газу (кг/м³); в'язкість газу μ_r ; коефіцієнт витрати.

Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	Q _{газ} , м ³ /год.	Q, м ³ /год.	v, м/с	ΔP_p , МПа	γ	β , рад
1	3000	30	0,5	0,5	0,85	60
2	2500	25	0,4	0,4	0,80	65
3	2000	20	0,3	0,3	0,78	70
4	1500	15	0,2	0,2	0,73	75
5	1000	10	0,15	0,15	0,7	80
6	500	5	0,15	0,15	0,65	60
7	2200	22	0,45	0,45	0,67	70
8	1800	18	0,22	0,22	0,75	80
9	1200	12	0,25	0,25	0,79	65
10	2700	29	0,48	0,48	0,88	63
11	2200	26	0,44	0,44	0,82	68
12	1700	22	0,35	0,35	0,77	73
13	1100	15	0,21	0,21	0,74	78
14	1900	12	0,13	0,13	0,71	81
15	700	8	0,16	0,16	0,66	65
16	2300	23	0,24	0,24	0,68	73
17	1700	16	0,21	0,21	0,78	83
18	1300	6	0,2	0,2	0,79	67

Методика розрахунку

Визначають перетин скрубера:

$$S = \frac{Q_{\text{газ}}}{v}, \quad (2.30)$$

де $Q_{\text{газ}}$ – витрата газу, що очищається, м³/с;

v – швидкість потоку, м/с.

Визначають діаметр скрубера:

$$D_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}. \quad (2.31)$$

Визначають висоту скрубера:

$$H_{ск} = (3 \div 4)D_{ск}. \quad (2.32)$$

Визначають діаметр сопла форсунки:

$$d_c = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_p}{\rho_p}}}}, \text{ м}, \quad (2.33)$$

де Q – потрібна продуктивність форсунки, $\text{м}^3/\text{с}$;

ΔP_p – перепад тиску, Па.

Для води $\rho_p = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Далі значення d_c переводять в мм.

Визначають діаметр вкладиша та рівний йому внутрішній діаметр корпусу форсунки:

$$D = 1,925 * d_c, \text{ мм}. \quad (2.34)$$

Якщо $d_c \leq 14$ мм, то значення D приймають рівним 27 мм.

Визначають висоту вкладиша:

$$h = 2,5 + 2 * d_c, \text{ мм}. \quad (2.35)$$

Визначають довжину соплового каналу:

$$l_1 = (0,5 \div 1,0)d_c, \text{ мм}. \quad (2.36)$$

Визначають висоту камери зміщення:

$$l_2 = \frac{D - d_c}{2 * \tan \frac{\theta}{2}}, \text{ мм}, \quad (2.37)$$

де кут конусності камери $\Theta = 110 \div 130^\circ$.

Визначають діаметр центрального каналу:

$$d_0 = d_c \sqrt{0,676 - 0,024 * d_c}, \text{ мм.} \quad (2.39)$$

Визначають сумарну площу каналів, що завихрюють:

$$S_k = 1,075 * \pi * d_0^2, \text{ мм}^2. \quad (2.40)$$

Визначають кут нахилу каналів, що завихрюють:

$$lg \alpha = 0,053 * \beta \left(\frac{d_0^2}{d_c^2} \right)^{0,58} + 0,32, \quad (2.41)$$

де β вимірюється в [рад] (1 рад = 57,3 град). Далі знаходять $\alpha = 10^x$, [рад], і переводять у [град], де $x = lg \alpha$.

Визначають розмір каналів, що завихрюють:

$$\alpha = \sqrt{\frac{S_k}{n * \cos \alpha}}, \quad (2.42)$$

де n – число каналів ($n = 4 \div 6$) (якщо $\alpha > 90^\circ$, то замінюємо $\cos \alpha$ на $\cos(\alpha - 90^\circ)$).

За необхідністю визначають середній обсягово-поверхневий діаметр крапель рідини:

$$d_p = 0,154 * \Delta P_p^{0,44} * d_c^{0,23}, \text{ мм,} \quad (2.43)$$

де ΔP_p в [МПа], d_c в [мм].

Задача 5 (Розрахунок адсорберів)

Вступна частина

Фізико-хімічними способами очищення газів є абсорбція, адсорбція, хемосорбція, термічна та каталітична нейтралізація.

Абсорбція (газів) – це процес поглинання одного або декількох компонентів з газового середовища об'ємом рідкого поглинача (абсорбентом), що призводить до утворення розчину.

Адсорбцією (газів) називають процес концентрування однієї або кількох компонентів (адсорбату) з газового середовища на поверхні поділу між газом та адсорбентом. Якщо поглинання речовини пов'язано з хімічною взаємодією з поглиначом, процес називається хемосорбцією. Хемосорбція вигідна при невеликій концентрації забруднювача, є одним з поширених способів очищення газів, що відходять від оксидів азоту.

Якщо хімічна взаємодія відсутня, то процес називається фізичною сорбцією. Зворотний процес сорбції називається десорбцією, і застосовується для регенерації (відновлення) сорбенту та витягу цінних компонентів.

При проектуванні абсорберів і адсорберів необхідно приділяти увагу на контакт газів з поглиначом. Чим більше поверхня розділу фаз, турбулентність потоків і дифузія, тим ефективніший процес.

Організація контакту газового потоку з рідким поглиначом здійснюється пропусканням газу через насадочну колону, розпиленням рідини, барботуванням та іншими способами. Газ називається розчинним, якщо його розчинність при $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $P = 100\text{ кПа}$ складає сотні грамів на 1 кг розчинника. Наприклад, для уловлювання аміаку, хлористого та фтористого водню в якості абсорбенту застосовується вода; для вловлювання парів води – сірчиста кислота; для уловлювання ароматичних вуглеводнів – в'язкі олії.

В якості твердих сорбентів застосовують мікропористі речовини, які мають велику площу поверхні на одиницю маси.

Активоване (активне) вугілля отримують термічною обробкою (випарювання) різних вуглевмісних речовин без доступу повітря. Питома площа поверхні активного вугілля становить $10^5\text{--}10^6\text{ м}^2/\text{кг}$.

Силікагелі та алюмогелі представляють собою продукти термічної обробки (зневоднення) гелів кремнієвих та алюмінієвих (гідроксид алюмінію)

кислот. Вони мають широкий набір пор різних розмірів, тому можуть поглинати одразу кілька компонентів. Цеоліти – природні та синтетичні алюмосилікати, відрізняються високою однорідністю пор, а тому високою селективністю. Це дозволяє застосовувати принцип «молекулярного сита», тобто застосування набору цеолітів з різними розмірами пор для почергової сорбції різних компонентів – від дрібних молекул до великих.

Серед сорбентів особливе місце займають аніоніти та катіоніти – природні або синтетичні іонообмінні смоли у вигляді зерен розміром до 1–1,5 мм, наприклад, зерна сульфованого полістиролу.

При виборі сорбенту висуваються такі вимоги:

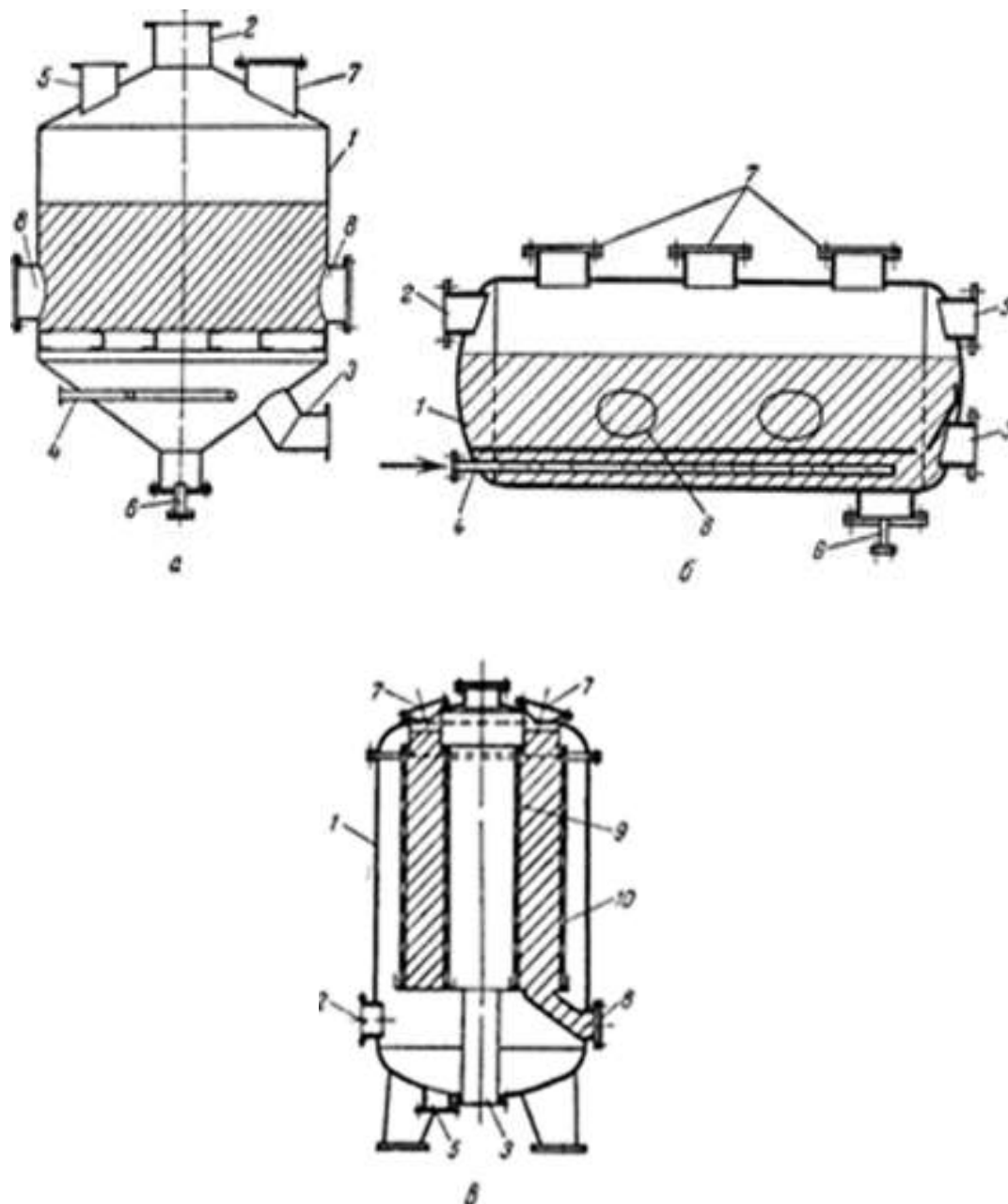
- селективність – вибіркоче поглинання компонента;
- велика поглинальна здатність – зменшує витрати;
- низька леткість – уникнення втрат з газом;
- стійкість – відсутність здатності до розкладання, окислення;
- доступність і дешевизна, легка генерованість.

На практиці доводиться йти на компроміс у кожному конкретному випадку, оскільки сорбент неспроможний задовольняти всім вимогам одночасно.

Адсорбція широко застосовується: для уловлювання парів розчинника з повітря при фарбуванні автомобілів; для очищення вихлопних газів; для уловлювання парів ефіру, ацетону у виробництві нітроцелюлози та бездимного порошу; для уловлювання органічних смол і пари розчинника в системі вентиляції підприємств з виробництва скловолокна та склотканин; для уловлювання отруйних речовин на виході лабораторних витяжних шаф; для уловлювання радіоактивних газів (йод) при експлуатації ядерних реакторів та багато іншого.

Адсорбери конструктивно поділяють на вертикальні (рис. 2.7), горизонтальні та кільцеві. Адсорбери також бувають періодичної та безперервної дії. При розрахунку та проектуванні адсорбера необхідна наявність наступних вихідних даних:

- об'ємна витрата газу, що очищається (викидів) Q , м³/с;
- концентрація домішки на вході адсорбера c_0 , кг/м³;
- властивості газу, що очищається (температура, щільність, в'язкість);
- властивості передбачуваного типу сорбенту (щільність, поглинальна здатність, форма зерен тощо).



a – вертикальний; *б* – горизонтальний; *в* – кільцевий:

1 – корпус; 2 – штуцер для подачі парогазової суміші; 3 – штуцер для відводу газу;
 4 – барботер для подачі гострої пари для десорбції; 5 – штуцер для відводу парів при десорбції; 6 – штуцер для відводу конденсату; 7 – люки для завантажування поглинача;
 8 – люки для вивантаження поглинача; 9 і 10 – внутрішня та зовнішня циліндричні решітки

Рисунок 2.7 – Адсорбери періодичної дії з нерухомим шаром поглинача

Вихідні дані для розрахунку адсорбера наведені в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Вихідні дані для розрахунку адсорбера

№ вар	Q, м ³ /год	Речовина	V _{мА} , см ³ /моль	c ₀ , мг/м ³	d _з , мм	ρ _н , кг/м ³	ρ _к , кг/м ³	α, кг/кг	ΔP, Па
1	1000	CO	30,7	60	8	500	750	0,2	3500
2	950	SO ₂	44,8	70	7	450	700	0,19	4000
3	1200	NO	23,6	80	10	400	650	0,18	2500
4	1100	NH ₃	25,8	90	9	350	550	0,17	4500
5	900	H ₂ S	32,9	140	8	550	800	0,16	2000
6	800	Cl ₂	48,4	130	7	600	850	0,15	3600
7	550	C ₆ H ₆	96,0	120	5	500	750	0,2	1500
8	1200	Cl ₂	24,6	110	10	450	700	0,19	3000
9	450	I ₂	71,5	100	6	400	650	0,18	2000
10	1100	CO	30,7	65	8,5	520	730	0,17	3200
11	1000	SO ₂	44,8	75	7,5	460	710	0,16	4100
12	1250	NO	23,6	85	10,5	430	630	0,15	2800
13	1150	NH ₃	25,8	5	9,5	360	540	0,2	4300
14	980	H ₂ S	32,9	145	8,5	560	810	0,19	1900
15	830	Cl ₂	48,4	135	7,5	600	850	0,19	3500
16	560	C ₆ H ₆	96,0	125	5,5	500	750	0,2	1500
17	1300	Cl ₂	24,6	115	11	450	700	0,19	3000
18	470	I ₂	71,5	105	6,5	400	650	0,18	2000

Методика розрахунку

Обирають робочу температуру (мінімально можливу) і тип сорбенту. Вибір сорбенту проводиться за ізотермою адсорбції при даних t і c_0 . У даній розрахунковій роботі параметри сорбенту наведено у таблиці вихідних даних (варіантів).

Розраховують коефіцієнт дифузії домішки в повітрі:

$$D = \frac{0,0435 * T^{1,5}}{P * (V_{mA} + V_{mB})} * \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}, \frac{m^2}{c} \quad (2.44)$$

де T – температура потоку (приймаємо 293 К);

P – тиск, Па (приймаємо 10^5 Па);

V_{mA} , V_{mB} , M_A і M_B – мольні об'єми, (см³/моль) і маси (кг/кмоль) відповідно домішки (А) і повітря (В).

Для повітря: $V_{mB} = 29,9$ см³/моль; $M_B = 29$ кг/кмоль.

Розраховують коефіцієнт масопередачі:

$$K = \frac{1,6 * D}{d_3^{1,46}} \left(\frac{v_0}{\vartheta} \right)^{0,54} \cdot \frac{1}{c}, \quad (2.45)$$

де D – коефіцієнт дифузії, m^2/c ;

v_0 – швидкість газового потоку, який надходить в адсорбер, приймаємо $v_0 = 0,5 m/c$;

ϑ – кінематична в'язкість газу, що очищається, m^2/c (для повітря, при $20\text{ }^\circ C$: кінематична в'язкість $\vartheta = 16 * 10^{-6} m^2/c$, щільність $\rho = 1,2\text{ кг}/m^3$);

d_3 – розмір зерна сорбенту, m .

Час процесу адсорбції:

$$\tau = \left(\sqrt{\frac{c * L}{v_0 * c_0}} - b * \sqrt{\frac{c}{K * c_0}} \right)^2, \quad c, \quad (2.46)$$

де c – концентрація речовини, що адсорбується в адсорбенті, рівноважна з концентрацією потоку, $c = \alpha * \rho_n$, $кг}/m^3$;

L – висота шару адсорбенту, приймаємо $L = 1\text{ м}$.

Коефіцієнт b визначається залежно від концентрації домішки на вході адсорбера c_0 ($кг}/m^3$) та необхідної концентрації домішки на виході з адсорбера c_1 (табл. 2.12). Приймаємо $c_1 = 1\text{ мг}/m^3$. Одиниці вимірювання переводимо в одиниці системи СІ.

Таблиця 2.12 – Значення коефіцієнта b

c_1/c_0	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,010	0,012	0,014	0,030
b	1,84	1,80	1,76	1,73	1,70	1,67	1,62	1,58	1,32

Мінімально необхідна маса сорбенту:

$$m = \frac{Q * c_0 * \tau}{\alpha} * K_3, \quad кг, \quad (2.47)$$

де α – статична поглинальна здатність сорбенту в робочих умовах, $кг}/кг$;

$K_3 = 1,2$ – коефіцієнт запасу.

Коефіцієнт форми зерен, що враховує різну доступність усієї поверхні зерна потоку, що обдуває:

$$K_\phi = \frac{1,5*d_3*l_3}{(l_3+0,5*d_3)*(1,5*d_3^2*l_3)^{1,3}}, \quad (2.48)$$

де d_3 и l_3 – діаметр і довжина зерен, мм. При $d_3 = l_3$ отримаємо:

$$K_\phi = \frac{d_3}{1,69 * d_3^{3,9}}, \quad (2.49)$$

де d_3 – діаметр зерен, мм.

Пористість шару сорбенту:

$$\Pi = \frac{\rho_k - \rho_n}{\rho_k}, \quad (2.50)$$

де ρ_k і ρ_n – щільність сорбенту, що здається і насипна щільність сорбенту, кг/м³.

Еквівалентний діаметр зерен:

$$d_e = \frac{\Pi*d_3*l_3}{(1-\Pi)*(0,5*d_3+l_3)^{1,3}} = \frac{\Pi*d_3}{1,5*(1-\Pi)}, \text{ м}, \quad (2.51)$$

де d_3 – діаметр зерен, м;

Π – пористість шару сорбенту.

Коефіцієнт гідравлічного опору:

$$Re = \begin{cases} \frac{220}{Re}, & \text{якщо } Re < 50 \\ \frac{11,6}{Re^{0,25}}, & \text{якщо } 50 \leq Re \leq 7200 \end{cases} \quad (2.52)$$

Критерій Рейнольдса Re , що враховує характер потоку:

$$Re = \frac{v_0 * d_e * \rho_r}{\mu}, \quad (2.53)$$

де $v_0 = 0,5$ м/с; $\rho_r = 1,2$ кг/м³; $\mu = 19,2 * 10^{-6}$ Па*с.

Визначають швидкість потоку газу через адсорбер залежно від падіння тиску, параметрів сорбенту та газу:

$$v = \sqrt[3]{\frac{4 * K_{\phi} * \Delta P * d_e * \Pi^3 * \rho_H * Q}{3 * R * \rho_r * (1 - \Pi) * m}}, \text{ м/с}, \quad (2.54)$$

де ΔP – падіння тиску, Па.

Діаметр адсорбера:

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * v * \Pi}}, \text{ м}. \quad (2.55)$$

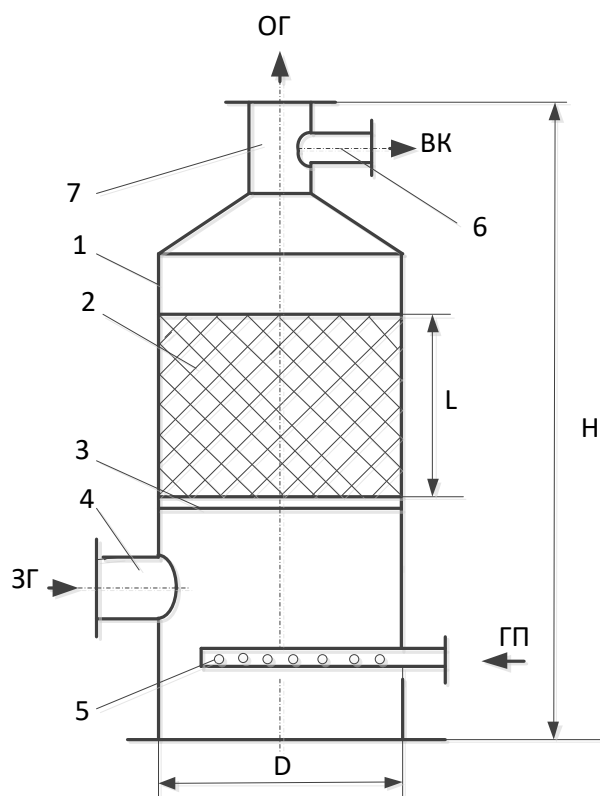
Висота шару сорбенту:

$$L = \frac{4 * m}{\pi * \rho_H * D^2}, \text{ м}. \quad (2.56)$$

Висота апарату:

$$H = (1,2 \dots 1,5)D. \quad (2.57)$$

Накреслити конструктивну схему апарату з розмірами відповідно до рисунка 2.8.



- 1 – корпус; 2 – адсорбент; 3 – решітка; 4 – патрубок вхідний для ЗГ (забрудненого газу);
 5 – пристрій для подачі ГП (гострої пари); 6 – патрубок відведення ВК (вловлений компонент) при десорбції; 7 – патрубок відведення ОГ (очищеного газу)

Рисунок 2.8 – Схема адсорбера

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Процессы и аппараты химической технологии / Под ред. А. М. Кутепова. Т.1 и 2. М. : Логос, 2002. 600 с.
2. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии / Под ред. В. Г. Айнштейна. Кн. 1 и 2. М. : Логос, ВШ, 2003. 1760 с.
3. Инженерная экология / Под. ред. В. Т. Медведева. М. : Гардарики, 2002. 688 с.
4. Инженерная экология и экологический менеджмент / Под. ред. Н. И. Иванова и И. М. Фадиной. М. : Логос, 2003. 528 с.
5. Тимонин А. С. Инженерно-экологический справочник. Т.1-4. Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2003.

Значення нормальної функції розподілу x

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	0,288	-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	0,929
-1,74	0,0409	-0,66	0,2546	0,40	0,6554	1,48	0,9306
-1,72	0,0427	-0,64	0,261	0,42	1,6628	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
-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	0,3754	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	2	3	4	5	6	7	8
-1,30	0,0968	-0,22	0,4129	0,84	0,7995	1,92	0,9726
-1,28	0,1003	-0,20	0,4207	0,86	0,8051	1,94	0,9738
-1,26	0,1038	-0,18	0,4286	0,88	0,8106	1,96	0,9750
-1,24	0,1075	-0,16	0,4364	0,90	0,8159	1,98	0,9761
-1,22	0,1112	-0,14	0,4443	0,92	0,8212	2,00	0,9772
-1,20	0,1151	-0,12	0,4522	0,94	0,8264	2,10	0,9821
-1,18	0,1190	-0,10	0,4602	0,96	0,8315	2,20	0,9861
-1,16	0,1230	-0,08	0,4681	0,98	0,8365	2,30	0,9893
-1,14	0,1271	-0,06	0,4761	1,00	0,8413	2,40	0,9918
-1,12	0,1314	-0,04	0,4840	1,02	0,8461	2,50	0,9938
-1,10	0,1357	-0,02	0,4920	1,04	0,8508	2,60	0,9953
-1,08	0,1401	-0,00	0,5000	1,06	0,8554	2,70	0,9965