

В.В. ШАРАВАРА

ОХОРОНА АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ:

Навчальний посібник

**Кам'янець-Подільський
2012**

Автор: В.В. Шаравара – асистент кафедри загальної екології.

Рецензенти:

В.В. Шаравара. Охорона атмосферного повітря: теорія і практикум. Навчальний посібник. – Кам'янець-Подільський:

У посібнику викладені теоретичні питання охорони атмосферного повітря, показано значення дисципліни в системі охорони навколишнього середовища і всіх його сфер. Розглянуті основні антропогенно-техногенні джерела і особливості забруднення повітря та його наслідки. Подана характеристика забруднювачів, методів і засобів їх визначення в повітрі та вилучення з газоповітряних сумішей.

Посібник містить лабораторні роботи з охорони атмосферного повітря, в яких наведено завдання, а також методичні рекомендації щодо їх виконання. Кращому засвоєнню матеріалу сприятиме інформація наведена в теоретичних положеннях, на які звертається увага при виконанні кожної лабораторної роботи.

Навчальний посібник написано згідно з навчальною програмою Міністерства освіти і науки України з дисципліни “Охорона атмосферного повітря”.

Для студентів екологічних спеціальностей вищих навчальних закладів, викладачів охорони атмосферного повітря, нормування антропогенного навантаження на природне середовище, моніторингу довкілля.

© Шаравара В.В., 2012.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	9
ЧАСТИНА I ОЦІНКА АНТРОПОГЕННО-ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ.....	11
Розділ 1 Атмосфера і її роль. Джерела і наслідки забруднення атмосфери.....	12
1.1. Атмосфера – зовнішня оболонка Землі.....	12
1.2. Будова атмосфери.....	14
1.3. Забруднення атмосфери і його види	16
1.4. Джерела забруднення атмосфери	19
1.5. Основні хімічні домішки, що забруднюють атмосферу	21
1.6. Наслідки забруднення атмосфери	25
1.6.1. Зміна природного складу і параметрів атмосфери	25
1.6.2. Кислотні опади	28
1.6.3. Запустелювання	31
1.6.4. Забруднення атмосфери біологічними домішками	31
Розділ 2 Нормування впливу техногенних об'єктів на атмосферне повітря	33
2.1. Показники нормування забруднюючих речовин в повітрі	33
2.2. Оцінка стану повітряного середовища.....	35
2.3. Науково-технічні нормативи на гранично допустимі викиди.....	39
2.4. Інструменти економічного механізму охорони атмосферного повітря	43
2.5. Порядок встановлення нормативів збору за забруднення і погіршення якості атмосферного повітря	45
Розділ 3 Організація спостережень за забрудненням атмосферного повітря	49
3.1. Загальні вимоги до організації спостережень за забрудненням атмосферного повітря	49
3.2. Види постів спостережень, програми і терміни спостережень	52
3.3. Лабораторії спостереження і контролю за забрудненням атмосферного повітря	54
3.4. Автоматизовані системи спостереження і контролю за станом атмосферного повітря	62

Розділ 4 Оцінювання забруднення атмосферного повітря на основі даних лабораторних спостережень.....	73
4.1. Методи оцінювання забруднення атмосферного повітря.....	73
4.2. Методи відбору проб атмосферного повітря для лабораторного аналізу.....	76
4.3. Метеорологічні спостереження при відборі проб повітря.....	82
4.4. Оцінювання стану атмосферного повітря за результатами спостережень.....	87
Розділ 5 Оцінювання забруднення атмосферного повітря на основі спостережень за біологічними об'єктами.....	91
5.1. Біоіндикація атмосферного повітря.....	91
5.2. Забруднюючі речовини і їх суміші, які впливають на рослинний покрив.....	92
5.3. Рослини-індикатори і рослини-монітори.....	97
Частина II ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ ВІД ВИКИДІВ ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ ТА ПАРИ.....	101
Розділ 6 Методи захисту атмосферного повітря від шкідливих викидів.....	102
6.1. Основні напрямки захисту атмосфери від шкідливих домішок.....	102
6.2. Методи і системи очищення повітря від газоподібних домішок.....	104
Розділ 7 Абсорбційна і хемосорбційна очистка газових викидів.....	108
7.1. Використання методів абсорбції і хемосорбції для вловлювання газоподібних домішок.....	108
7.2. Конструкції і принцип дії абсорберів.....	111
7.2.1. Насадочні абсорбери.....	113
7.2.2. Тарілчасті абсорбери.....	118
7.2.3. Розпилюючі абсорбери.....	125
7.3. Розрахунок абсорбційних і хемосорбційних апаратів.....	128
7.3.1. Розрахунок насадочних абсорберів.....	130
7.3.2. Розрахунок тарілчастих абсорберів.....	135
7.3.3. Розрахунок розпилюючих абсорберів.....	138
7.4. Десорбція забруднювачів із абсорбентів.....	140
Розділ 8 Адсорбційна очистка газових викидів.....	143
8.1. Використання методу адсорбції для вловлювання газоподібних сполук.....	143
8.2. Будова і принцип дії адсорберів.....	144

8.2.1. Адсорбери періодичної дії.....	144
8.2.2. Адсорбери безперервної дії.....	152
8.3. Принципи розрахунку адсорберів	158
8.3.1. Розрахунок адсорберів періодичної дії	158
8.3.2. Розрахунок адсорберів безперервної дії	168
8.4. Десорбція адсорбованих продуктів	169
Розділ 9 Конденсаційне очищення газових викидів	172
9.1. Використання конденсаційного очищення газів і пари	172
9.2. Принцип конденсаційного очищення	173
9.3. Типи і конструкції конденсаторів.....	174
9.4. Розрахунок конденсаторів	176
Розділ 10 Термокаталітична і термічна очистка газових викидів	187
10.1. Термокаталітична очистка газових викидів	187
10.2. Термічні методи знешкодження газоподібних сполук.....	192
10.2.1. Установки термознешкодження газових викидів	193
10.2.2. Принципи розрахунку установок термознешкодження	198
Розділ 11 Очистка газових викидів автомобільного транспорту	201
11.1. Характеристика викидів двигунів внутрішнього згорання	201
11.2. Зниження викидів двигунів внутрішнього згорання	203
11.3. Нейтралізація вихлопів двигунів внутрішнього згорання	206
11.4. Вловлювання аерозолів, що викидаються дизельним двигуном	212
Розділ 12 Оцінка ефективності очищення газових викидів.....	214
12.1. Оцінка ефективності пристроїв для очищення газових викидів	214
12.2. Вибір варіантів газоочистки.....	217
ЧАСТИНА III ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ ВІД АЕРОЗОЛЬНИХ ПИЛОВИХ ВИКИДІВ	220
Розділ 13 Методи і системи очищення повітря від аерозолів	221
13.1. Характеристики аерозольних викидів в атмосферу	221
13.2. Класифікація методів і апаратів для очищення аерозолів	225
13.3. Основні характеристики апаратів для очистки аерозолів.....	231
Розділ 14 Механічне пиловловлювання.....	235

14.1. Пилоосаджувальні камери.....	236
14.2. Циклонні осаджувачі	243
14.2.1. Конструкції циклонів	245
14.2.2. Розрахунок циклонів	252
14.3. Вихрові пиловловлювачі	257
Розділ 15 Фільтрування аерозолів	262
15.1. Волокнисті фільтри	263
15.2. Тканинні фільтри.....	266
15.2.1. Фільтрувальні тканини	267
15.2.2. Рукавні фільтри	271
15.3. Зернисті фільтри.....	277
15.4. Розрахунок і вибір газових фільтрів.....	278
Розділ 16 Мокре пиловловлювання.....	286
16.1. Порожнисті газопромивачі.....	291
16.2. Зрошувані циклони з водяною плівкою.....	293
16.3. Пінні пиловловлювачі.....	298
16.4. Ударно-інерційні пиловловлювачі	302
16.5. Швидкісні пиловловлювачі (скрубери Вентурі).....	308
Розділ 17 Електричне очищення газів.....	317
17.1. Принцип дії електрофільтрів.....	318
17.2. Конструкції електрофільтрів.....	323
17.3. Підбір і розрахунок електрофільтрів.....	330
Розділ 18 Вдосконалення процесів і апаратів для пилогазоочистки	338
18.1. Спеціалізація апаратів.....	339
18.2. Попередня обробка аерозолів	339
18.3. Режимна інтенсифікація	343
18.4. Конструктивно-технологічне вдосконалення	343
18.5. Багатоступінчате очищення	344
Розділ 18 ОЧИСТКА ПРОМИСЛОВИХ ГАЗІВ ВІД ДІОКСИДУ СУЛЬФУРУ І ОКСИДІВ НІТРОГЕНУ	Ошибка! Закладка не определена.
18.1. Методи очистки промислових газів від діоксиду сульфуру.....	Ошибка!

Закладка не определена.

18.2. Методи очистки промислових газів від оксидів нітрогену **Ошибка! Закладка не определена.**

Розділ 19 ОЧИСТКА ПРОМИСЛОВИХ ГАЗІВ ВІД ОКСИДУ КАРБОНУ, ДІОКСИДУ КАРБОНУ І СІРКОВОДНЮ **Ошибка! Закладка не определена.**

19.1. Очистка промислових газів від оксиду карбону (CO) **Ошибка! Закладка не определена.**

19.2. Очистка промислових газів від діоксиду карбону **Ошибка! Закладка не определена.**

19.3. Очистка промислових газів від сірководню **Ошибка! Закладка не определена.**

Розділ 20 ЗАСОБИ І ПРИСТРОЇ ОЧИСТКИ ПРОМИСЛОВИХ ГАЗІВ ВІД ПИЛОВИХ ДОМІШОК **Ошибка! Закладка не определена.**

20.1. Вимоги до якості і ступеня очистки промислових газів **Ошибка! Закладка не определена.**

20.2. Сепарація пилу в механічних знепилюючих пристроях **Ошибка! Закладка не определена.**

20.3. Сепарація пилу в мокрих знепилюючих пристроях **Ошибка! Закладка не определена.**

20.4. Сепарація пилу за допомогою фільтруючих пристроїв **Ошибка! Закладка не определена.**

20.5. Сепарація пилу в електрофільтрах **Ошибка! Закладка не определена.**

20.6. Вловлювання крапельної рідини **Ошибка! Закладка не определена.**

20.7. Порівняльні характеристики і вибір газоочисних пристроїв **Ошибка!**

Закладка не определена.

Частина III ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Лабораторне заняття №1..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Лабораторне заняття №2..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Лабораторне заняття №3..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Лабораторне заняття №4..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Лабораторне заняття №5..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Лабораторне заняття №6.....	Ошибка! Закладка не определена.
Лабораторне заняття №7.....	Ошибка! Закладка не определена.
Лабораторне заняття №8.....	Ошибка! Закладка не определена.
Лабораторне заняття №9.....	Ошибка! Закладка не определена.
Лабораторне заняття №10	Ошибка! Закладка не определена.
Лабораторне заняття №11	Ошибка! Закладка не определена.
Лабораторне заняття №12	Ошибка! Закладка не определена.
Лабораторне заняття №13	Ошибка! Закладка не определена.
Лабораторне заняття №14	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТКИ.....	345
ЛІТЕРАТУРА.....	356

ПЕРЕДМОВА

Антропогенна діяльності, яка пов'язана із реалізацією економічних, рекреаційних, культурних інтересів людини, вносить фізичні, хімічні, біологічні зміни в природне середовище. Найпоширенішим видом негативного впливу є забруднення атмосферного повітря, яке наносить шкоди життю і здоров'ю людини, рослинному і тваринному світу та екосистемам в цілому.

В сучасних умовах розвитку необхідно застосовувати прогресивні методи та засоби екологічного контролю при вирішенні проблем охорони атмосферного повітря. Для цього необхідно володіти знаннями багатьох методик аналізу повітря, правильного відбору зразків для аналізу, підготовки і проведення досліджень, статистичної обробки результатів та проведення інших операцій.

Мета вивчення дисципліни "Охорона атмосферного повітря" полягає у необхідності формування знань та умінь студентів у галузі охорони довкілля, збереження і раціонального використання природних ресурсів, впровадження сучасних високоефективних методів очищення повітря і забезпечення покращення характеристик його якості.

Основними задачами дисципліни є надати студентам знання з нормування якості повітря, сутності, видів та рівнів моніторингу атмосферного повітря і біоіндикації як методів наукового пізнання, заходів і засобів зменшення негативного антропогенного впливу на атмосферне повітря.

Після вивчення курсу "Охорона атмосферного повітря" студент повинен:
знати:

- теоретичні, нормативно-правові та методологічні основи охорони атмосферного повітря, методи і методики визначення якості атмосферного повітря;
- еколого-оптимізуючі показники забруднюючих речовин в атмосферному повітрі, правила встановлення допустимих викидів шкідливих речовин промисловими підприємствами;
- екологічне нормування якості атмосферного повітря, впливу техногенних об'єктів на атмосферне повітря та його забруднень;
- нормування зборів і плати за викиди шкідливих речовин стаціонарними і пересувними джерелами забруднення атмосферного повітря;
- організацію спостережень за забрудненням атмосферного повітря і оцінку його стану за результатами спостережень;
- методи очистки промислових газів і зниження забруднення атмосфери викидами від двигунів внутрішнього згорання.

вміти:

- визначати шкідливі речовини і розраховувати їх концентрації, що викидаються підприємствами і транспортом, визначати ефект сумарності цих речовин;
- встановлювати категорію небезпечності підприємства, проводити уточнення розмірів санітарно-захисної зони і визначати кількість постів спостереження за станом атмосферного повітря і місця їх розташування;

- *проводити інвентаризацію джерел забруднення атмосферного повітря і виконувати статистичну оцінку екологічного стану атмосферного повітря, складати геоекологічні карти забруднення атмосферного повітря.*

ЧАСТИНА І

ОЦІНКА АНТРОПОГЕННО-ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

- Розділ 1. АТМОСФЕРА І ЇЇ РОЛЬ. ДЖЕРЕЛА І НАСЛІДКИ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ**
- Розділ 2. НОРМУВАННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОГЕННИХ ОБ'ЄКТІВ НА АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ**
- Розділ 3. ОРГАНІЗАЦІЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА ЗАБРУДНЕННЯМ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ**
- Розділ 4. ОЦІНЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ ДАНИХ ЛАБОРАТОРНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ**
- Розділ 5. ОЦІНЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА БІОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ**

Розділ 1

Атмосфера і її роль. Джерела і наслідки забруднення атмосфери

1.1. Атмосфера – зовнішня оболонка Землі

Ми живемо на дні великого повітряного океану – атмосфери. Повітряне середовище – одна з найважливіших складових частин біосфери – земної оболонки, яка наповнена живими організмами, що населяють Землю. Існування флори та фауни, а також всього живого на Землі (у тому числі і людини) неможливо без повітряного середовища. Хоча загальна потужність повітряної оболонки досягає лише половини радіусу Землі, за космічними масштабами вона виглядає тонкою плівкою. Загальна вага атмосфери надзвичайно мала ($5,15 \cdot 10^{15}$ т) – всього 1/1000000 ваги Землі, але захисні функції атмосфери переоцінити важко. Земне життя вразливе до космічних променів та потребує постійного і надійного захисту.

Повітряна оболонка Землі, як і будь-який зовнішній шар, здійснює і захисні функції. Хоча за нашими міркуваннями атмосфера ніяк не вкладається в поняття засобу захисту, саме атмосфера – безвідмовна перешкода для згубного впливу космосу. Атмосфера надійно захищає планету від космічного та ультрафіолетового випромінювання, визначає загальний тепловий режим поверхні Землі, впливає на кліматичні умови, а через них – на режими річок, ґрунтово-рослинний шар та процеси рельєфоутворення. Пробити атмосферу можуть лише крупні метеорити з початковою вагою в десятки та сотні тонн – явище, як відомо, надзвичайне. Метеорити меншої ваги – явище не рідкісне, проте вони повністю згорають в атмосфері.

Від Сонця на Землю потрапляє енергія, а значить і сама можливість життя. Саме атмосфера “відміряє” життєву дозу сонячної енергії. Якщо б не було атмосфери, вдень Сонце розігрівало б земну поверхню до $+100^{\circ}\text{C}$, а вночі до -100°C охолоджував би її космос. 200-градусний перепад добових температур набагато перевищує можливості виживання більшості, якщо не всіх, форм земного життя.

На зовнішню поверхню атмосфери щосекунди потрапляє потужний потік сонячних та інших космічних випромінювань широкого діапазону хвиль та енергій: γ -випромінювання, жорсткі рентгенівські промені, ультрафіолетові промені, видиме світло, інфрачервоне випромінювання тощо. Якщо б всі вони досягли земної поверхні, то миттєво вбивча їх енергія все живе перетворила б на попіл. Цього не трапляється і на Землі існує життя завдяки атмосфері.

Для нормальної життєдіяльності людини та всього живого на Землі необхідно не тільки присутність повітря, але і його певний склад. Від складу повітря залежить стан організму людини, його здоров'я. Порушення нормального складу повітряного середовища може завдавати негативного впливу не тільки на здоров'я людини, але і на розвиток людського організму, і, як наслідок, призвести до генетичних змін в ньому.

Повітряне середовище – необхідна умова існування фауни та флори Землі – визначає процеси геологічного розвитку Землі, кругообіг речовин в природі. Без повітряного середовища на сучасному етапі розвитку людства неможливо

здійснення життєво важливих технологічних процесів.

Атмосфера, газоподібна оболонка Землі, будучи складовою частиною біосфери, являє собою рівноважну систему, в якій безперервно проходять процеси обміну речовин, які проходять за певними законами. Характер цих процесів визначається багатьма факторами, і в першу чергу, складом самої атмосфери. Порушення цього складу, яке викликане діяльністю людини, може призводити до зміни природних процесів в атмосфері. Завдяки компенсаційним можливостям атмосфери, ці зміни до певного рівня антропогенного впливу на атмосферу не будуть незворотними. Проте із збільшенням масштабів такого впливу на атмосферу (як і на навколишнє середовище в цілому) ці компенсаційні можливості можуть бути вичерпаними, що може мати катастрофічні наслідки не тільки для окремих районів Землі, але і глобальні.

Одним із найважливіших показників стану атмосфери як середовища існування є хімічний склад її приземного шару. При всьому різноманітті фізичних та хімічних процесів в атмосфері, хімічний склад приземного її шару залишається практично постійним. Дослідження показали, що до висоти 20 км тенденцій до зміни складу атмосфери не спостерігається, що зумовлено, очевидно, інтенсивним її перемішуванням за рахунок конвективних потоків.

Атмосфера приземного шару являє собою суміш постійних та змінних газів. В групу постійних газів входять азот, кисень, аргон та інші інертні гази, а змінних – діоксиди карбону, сульфур та нітрогену, озон, водяна пара (табл.1.1).

Таблиця 1.1

Основний склад сухого чистого повітря в приземному шарі

Газ	Молекулярна маса	Відносний вміст у сухому повітрі, %		Загальний вміст в атмосфері Землі, т
		За обсягом	За масою	
Азот (N ₂)	28,02	78,08	75,53	4,0x10 ¹⁵
Кисень (O ₂)	32,0	20,95	23,14	1,2x10 ¹⁵
Аргон (Ar)	39,94	0,93	1,28	6,8x10 ¹³
Вуглекислий газ (CO ₂)	44,01	0,033	0,05	2,6x10 ¹²
Неон (Ne)	20,18	0,0018	0,001	5,3x10 ¹⁰
Гелій (He)	4,0	0,0005	0,00007	3,9x10 ⁹
Криптон (Kr)	16,05	0,00015	0,00008	4,4x10 ⁹
Ксенон (Xe)	83,7	0,0001	0,00003	1,6x10 ⁹
N ₂ O	44,02	0,00005	0,00008	4,2x10 ⁹
Водень (H ₂)	2,02	0,00005	0,000003	1,6x10 ⁸
Озон (O ₃)	48,0	0,00004	0,00007	3,7x10 ⁹

Атмосфера, завдяки сукупності різних факторів, постійно очищається від забруднюючих її речовин. Тверді частинки осаджуються під дією гравітаційних сил, їх коагуляції, електричних розрядів Землі, в результаті вимивання із атмосфери опадами. Останнє стосується і газоподібних, і рідких забруднень. В результаті атмосфера, як і природа в цілому, нейтралізує та відштовхує потрапляючі в неї шкідливі домішки. Цю здатність атмосфери довгий час людство використовувало “бездумно” і, як наслідок, людство все частіше стикається з регіональними екологічними кризами або передкризовими ситуаціями.

1.2. Будова атмосфери

Атмосферу за рядом особливостей прийнято умовно поділяти на ряд концентричних шарів різної товщини, кожному з яких притаманні деякі спільні риси. Шари відрізняються один від другого температурою, вологістю, циркуляцією повітря та іншими елементами. У 1962 р. Всесвітньою метеорологічною організацією прийнято такі назви шарів атмосфери: тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера, екзосфера (рис. 1.1).

Тропосфера – нижній і найщільніший шар атмосфери. У цьому шарі, який безпосередньо прилягає до Землі, зосереджено близько 80% усієї маси повітря. Над полюсами його товщина дорівнює 8 км, над екватором – 16 км, в середньому – 11 км. Такий неоднаковий розподіл товщини зумовлений термічними особливостями різних широт та обертанням Землі навколо вісі. Температура від земної поверхні знижується з висотою в середньому на $0,6^{\circ}$ кожні 100 м. При середній для всієї Землі річній температурі повітря $+14^{\circ}\text{C}$ на верхній межі тропосфери вона опускається до -56°C . Для тропосфери характерне горизонтальне й вертикальне переміщення повітряних мас, що зумовлює сталість її хімічного складу. Постійний рух повітря в тропосфері часто супроводжується утворенням хмар і опадами.

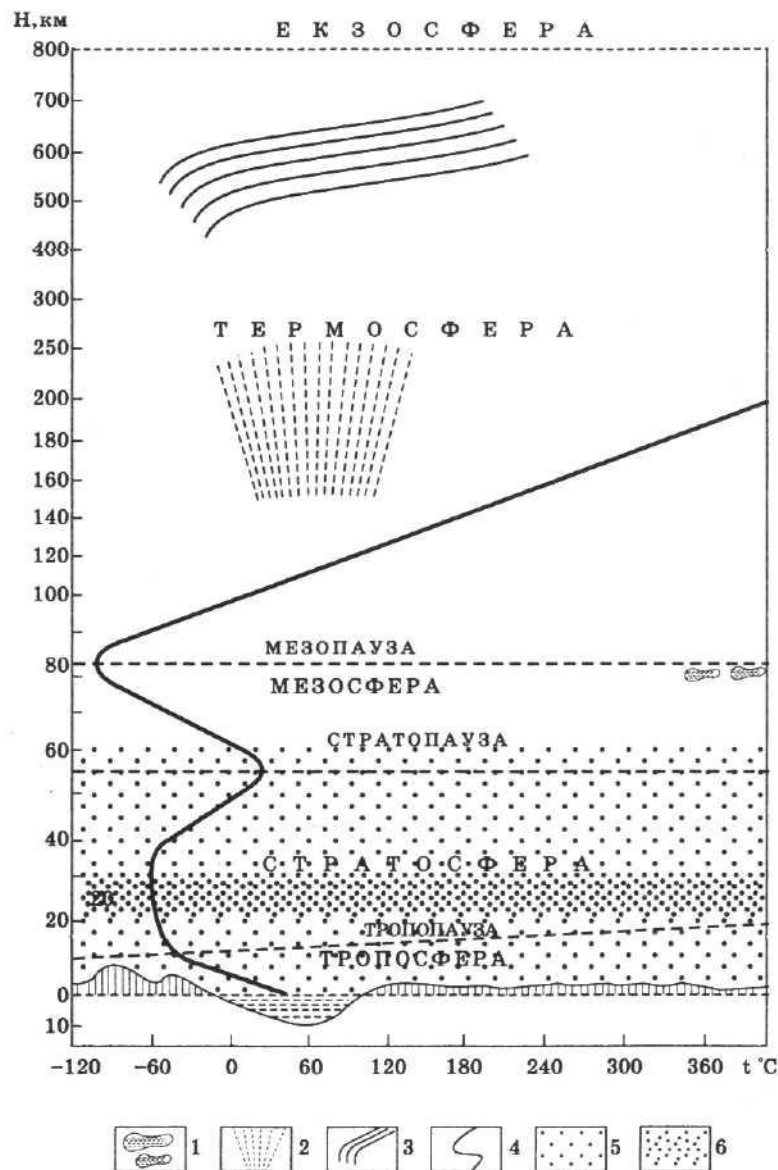


Рис. 1.1. Будова атмосфери

1 – сріблясті хмари; 2 – полярні саява в нижньому шарі термосфери; 3 – полярні саява у верхньому іонізованому шарі термосфери; 4 – температурна крива; 5 – шар поширення озону; 6 – шар найбільшої концентрації, озону

Пил і водяна пара зосереджені переважно в нижній частині атмосфери. Кількість водяної пари з висотою зменшується, бо знижується температура. Тому більша частина хмар утворюється в нижніх шарах тропосфери. Висота звичайних зливових хмар коливається від 3 до 8 км, а в тропічних областях вони можуть перебувати значно вище.

Стратосфера знаходиться безпосередньо над тропосферою і має висоту від 11 до 50...55 км. Нижня стратосфера ізотермічна: її температура постійна і становить -56°C. Але починаючи з висоти 25 км температура в стратосфері швидко зростає, досягаючи на висоті 50 км позитивних значень – від +1 до +5°C. В стратосфері мають місце сильні горизонтальні рухи типу струминних течій. Вони характеризуються постійністю і дуже високими швидкостями. Вертикальні переміщення повітря в стратосфері слабо розвинені, але вони сприяють перемішуванню повітря. Склад повітря такий, як і в тропосфері.

У стратосфері дуже мало завислих частинок. Інколи на висоті 20...30 км утворюються перламутрові хмари, що складаються з кристаликів льоду. Крізь стратосферу безперервно проходить метеоритний пил, а час від часу сюди потрапляє вулканічний попіл. Дуже дрібні частинки вулканічного пилу, що надзвичайно повільно осідають, поступово розносяться вітрами над усією планетою, забарвлюючи в яскраві кольори сходи і заходи Сонця протягом кількох місяців після виверження. Наявність великої маси вулканічного попелу в атмосфері знижує кількість сонячної радіації, що досягає поверхні Землі. Вважають, що надлишок вулканічного попелу в повітрі може бути причиною похолодання клімату і навіть сприяти утворенню льодовиків.

Важливою специфічною ознакою стратосфери є наявність в ній шару озону. Найбільша концентрація цього газу виявлена на висотах 23...27 км. Озон поглинає ультрафіолетові промені: на межі атмосфери вони становлять близько 7% загального потоку сонячної радіації, а до земної поверхні доходять лише соті долі відсотка.

Мезосфера знаходиться на висоті від 50...55 км до 80...85 км. Для неї характерне дуже швидке зниження температури з висотою. За допомогою метеорологічних супутників і ракет в мезосфері зареєстровано абсолютний мінімум для атмосфери – -143°C. Поблизу верхньої межі температура знижується до -70...90°C. Внаслідок швидкого падіння температури з висотою тут дуже розвинена турбулентність. Вітер у мезосфері відзначається частою змінністю. Взимку переважають західні вітри з максимальними швидкостями близько 100 м/с, а влітку – східні.

На висотах, які близькі до верхньої межі (82...85 км) мезосфери, утворюються видимі з Землі продовгуваті, блискучі, тонкі сріблясті хмари, природу яких ще не вивчено; можливо, вони складаються з дуже дрібних і розсіяних льодових кристаликів.

Термосфера (іоносфера) – величезна за об'ємом, хоч і мізерна за масою (0,5%) та складна за будовою частина атмосфери. Вона охоплює простір у межах від 80...85 до 800...1000 км. Складається переважно з азоту і кисню, які знаходяться в

іонізованому стані. Під впливом ультрафіолетового і рентгенівського випромінювань Сонця порушується будова їх молекул та атомів. З електронних оболонок атомів відриваються деякі електрони. При втраті одного з електронів атом набуває позитивного заряду. Самі ж електрони є носіями від'ємних зарядів. Так в іоносфері утворюються шари заряджених частинок. Найщільніший з них знаходиться на висотах від 300 до 400 км. З висотою відбувається істотна зміна в процентному співвідношенні азоту і кисню на користь останнього. Так, на висоті 200 км вміст азоту близько 45%, кисню – 55%. Вище за 600 км термосфера складається переважно з атомарного кисню.

В термосфері на висоті 80...90 км є холодний (-107°C) ізотермічний шар. Далі до 250 км температура зростає, а ще вище залишається практично незмінною.

Тонізоване повітря термосфери відіграє значну роль у природі та має велике практичне значення. Іоносфера поглинає рентгенівське проміння Сонця, що згубно впливає на все живе на Землі. Вона відбиває радіохвилі, чим забезпечується навколоземний радіозв'язок. У термосфері виникають полярні сяйва і близькі до них за природою світіння нічного неба – постійна люмінесценція атмосферного повітря, а також різкі коливання магнітного поля – іоносферні магнітні бурі.

Над термосферою розташована екзосфера – зовнішня частина земної атмосфери. Цю оболонку ще називають шаром розсіювання газів, бо окремі легкі елементи, які його складають – водень і гелій, долаючи сили земного тяжіння і магнітного поля, назавжди відлітають у космос. Температура в екзосфері з висотою зростає до 2000°C . Гази тут настільки розріджені, що частинки їх рухаються з величезними швидкостями, пролітають сотні кілометрів без зіткнень. Екзосфера поступово і непомітно переходить у міжпланетний простір.

Між кожними двома сусідніми оболонками виділяють перехідні зони або паузи. Так, тропосфера відокремлена від стратосфери тропопаузою, стратосфера від мезосфери – стратопаузою, а мезосфера від термосфери – мезопаузою. Це дуже тонкі перехідні шари з ознаками властивостей суміжних газових оболонок.

Не так давно вважалося, що атмосфера закінчується на висотах порядку 2000...3000 км. Але нові дані досліджень, одержані за допомогою супутників та ракет, дають підстави твердити, що навколо Землі існує ще так звана земна корона, яка складається з водню. Вона простягається більше ніж на 20 000 км.

Отже, атмосфера має шарувату будову. Нижні шари – головні для живих організмів. Але для біосфери Землі важливе значення мають і ті процеси, що відбуваються на верхніх “поверхах” повітряної оболонки.

1.3. Забруднення атмосфери і його види

Забруднення довкілля шкідливо впливає на всі сторони суспільного життя. Створюється загроза для здоров'я і життя людей, що може стати причиною підвищеної захворюваності, передчасного старіння, виникнення важких віддалених наслідків та можливих незворотних змін у майбутніх поколіннях. На жаль, на перший план завжди ставиться економічна ефективність виробництва, а питання захисту довкілля виносяться на другий план. Можливості, які сучасний технічний прогрес набув в галузі охорони навколишнього середовища, використовуються в обмеженому об'ємі.

В ситуації, яка склалась на сьогодні, очевидним стає необхідність докорінної зміни відношення людини до питань охорони довкілля в цілому і повітряного басейну в тому числі, інакше людству неминуче загрожує загальна екологічна катастрофа.

Забруднення атмосфери – це потрапляння в неї речовин різного походження, які або не властиві природному складу атмосфери, або знаходяться в концентраціях, які значно відрізняються від їх природного вмісту в атмосфері і шкідливо впливають на живі організми або пригнічують їх життєдіяльність. Це стосується насамперед приземного шару атмосфери.

Всі забруднення атмосфери за джерелами їх походження поділяють на природні (земні та позаземні) та штучні (антропогенні). Основними забруднювачами атмосфери антропогенного походження є викиди промислових підприємств. Джерела забруднення атмосфери викидами промислових підприємств – неутилізовані відходи різних підприємств, які утворюються в результаті обміну речовин та енергії промислових підприємств з навколишнім природним середовищем. Основними забрудненнями атмосфери є оксид карбону CO, діоксид сульфуру SO₂, оксиди нітрогену N_xO_y, вуглеводні C_nH_m, пил, пари кислот, біологічні забруднення. Відповідно до ГОСТ 17.2.1.01-76 (“Охорона природи. Атмосфера. Класифікація викидів за складом”), викиди в атмосферу класифікуються за агрегатним станом та кількістю викинутих в атмосферу речовин.

Отже, забруднення атмосферного повітря спричинене процесами і явищами, що відбуваються у природі, та промислово-побутовою діяльністю людини (табл. 1.2).

За агрегатним станом викиди поділяються на газоподібні, пароподібні (пари органічних розчинників), рідкі та тверді. За кількістю викинутих в атмосферу речовин викиди (джерела) поділяють на 6 груп: до 0,01 т/добу; від 0,01 до 0,1 т/добу; від 0,1 до 1,0 т/добу; від 1,0 до 10 т/добу; від 10 до 100 т/добу; понад 100 т/добу.

Таблиця 1.2

Маса забруднюючих речовин (т/рік), які викидаються в атмосферу

Речовина	Природні надходження	Антропогенні викиди
Оксид вуглецю (CO)	–	$3,5 \cdot 10^8$
Діоксид сірки (SO ₂)	$1,4 \cdot 10^8$	$1,45 \cdot 10^8$
Оксиди азоту (NO _x)	$1,4 \cdot 10^9$	$(1,5-2,0) \cdot 10^7$
Аерозолі (тверді частинки)	$(7,7-22,0) \cdot 10^{10}$	$(9,6-26,0) \cdot 10^{10}$
Поліхлорвінільні речовини, фреони	–	$2,0 \cdot 10^6$
Озон (O ₃)	$2,0 \cdot 10^9$	–
Вуглеводи	$1,0 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^6$
Свинець (Pb)	–	$2,0 \cdot 10^6$
Ртуть (Hg)	–	$5,0 \cdot 10^3$
Діоксид вуглецю (CO ₂)	$0,1 \cdot 10^{13}$	$0,18 \cdot 10^{11}$
Сірководень (H ₂ S)	$1,9 \cdot 10^7$	$0,36 \cdot 10^7$

Залежно від розміру часток тверді та рідкі викиди поділяють на групи:

- рідкі – супертонкий туман (до 0,5 мкм), тонкодисперсний туман (в межах 0,5...3,0 мкм), грубодисперсний туман (в межах 3,0...10,0 мкм) та краплі (понад 10 мкм);
- тверді (дими) – до 1,0 мкм, від 1,0 до 10 мкм, від 10 до 50 мкм і понад 50 мкм.

Залежно від форми матерії забруднення поділяють на речовинні (інгредієнтні), енергетичні (параметричні) і речовинно-енергетичні. До перших відносять

механічні, хімічні і біологічні забруднення, які зазвичай об'єднують загальним поняттям, – домішки, до других – теплові, акустичні, електромагнітні і іонізуючі випромінювання, а також випромінювання оптичного діапазону; до третіх – радіонукліди.

У глобальному масштабі найбільшу небезпеку представляє забруднення атмосфери домішками, оскільки атмосферне повітря виступає свого роду посередником забруднення всіх інших об'єктів природи, сприяючи розповсюдженню великих мас забруднення на значні відстані. Промисловими викидами (домішками), які переносяться по повітрю, забруднюється Світовий океан, закислюються ґрунт і вода, змінюється клімат і руйнується озоновий шар.

Всі забруднення повітряного басейну можна об'єднати в дві основні групи: матеріальні та енергетичні. Матеріальні забруднення поділяють також на дві підгрупи – хімічно інертні (нетоксичні) та хімічно активні (токсичні). В ці групи входять газоподібні, рідкі, тверді та змішані забруднення.

Токсичними називаються такі інгредієнти, які при перевищенні певної граничнодопустимої концентрації (ГДК) спричиняють загибель живих істот або пригнічують їхню життєдіяльність.

Нетоксичними є інгредієнти, які необхідні для розвитку живих організмів або не здійснюють негативний вплив на їхню життєдіяльність у певних межах концентрацій (вмісту), характерних для природного складу повітря. Проте, значне перевищення характерних для повітря концентраційних меж може призвести до негативного впливу нетоксичного інгредієнту на розвиток живих істот.

За характером впливу на живі організми можна виділити п'ять груп забруднень:

- загальносоматичні, які при певній кількісній дії можуть викликати отруєння всього організму (оксид карбону, неорганічні сполуки плюмбуму, меркурій тощо);
- сенсibiliзуючі або алергени (хімічно інертні сполуки, наприклад: нетоксичний пил, квітковий пилок тощо);
- подразнюючі – які викликають подразнення дихальних шляхів та слизових оболонок (діоксид сульфуру, хлор, аміак, оксиди нітрогену, озон тощо); канцерогенні, які викликають злоякісні пухлини (бенз(а)пірен, сполуки ніколу, сполуки хрому (VI), азбест, радон тощо);
- мутагенні, які призводять до генетичних змін (радіонукліди, органічні сполуки плюмбуму, сполуки мангану у вищих ступенях окислення, радій тощо).

Хімічно інертні забруднення, потрапляючи в організм людини, також можуть здійснювати на нього негативний вплив, в тому числі призводити до різного роду захворювань – екземи, алергії тощо.

Матеріальні забруднення шкідливо впливають не тільки на тваринний, але і на рослинний світ та неживу природу.

Енергетичні забруднення охоплюють промислові теплові викиди та всі види випромінювань – оптичне, електромагнітне, іонізуюче, акустичне. Особливостями енергетичних забруднень, на відміну від матеріальних, є обмеженість зони їх дії, а також те, що більшість з них негативно впливають на навколишнє середовище тільки в період генерації, тобто подібні забруднення (за винятком теплових) не накопичуються в навколишньому природному середовищі.

1.4. Джерела забруднення атмосфери

Як зазначалось, джерелами забруднення атмосфери можуть бути як природні так і антропогенні фактори. Природними джерелами забруднення атмосфери є вулкани, лісові пожежі, пилові бурі, поверхні вивітрювання, і вони не загрожують негативними наслідками природним екосистемам, за винятком деяких катастрофічних явищ. Останнім часом антропогенні фактори забруднення атмосфери стали перевищувати за масштабами природні, набуваючи глобального характеру, особливо щодо дії на клімат.

Забруднення, зумовлене діяльністю людини, викликають суттєві зміни в природному складі атмосфери. Основним його джерелом є промислові, транспортні та побутові викиди.

За певними підрахунками, за рахунок господарської діяльності людини в світі потрапляння забруднюючих речовин в атмосферу (на кінець 2000 року) набуло таких масштабів:

- оксидів карбону ($\text{CO} + \text{CO}_2$) – 25,5 млрд. т;
- оксидів сульфуру (SO_2 SO_3) – 190 млн. т;
- оксидів нітрогену (NO_2 NO) – 65 млн. т;
- хлорфторвуглеводнів (фреонів) – 1,4 млн.т.

Найпоширенішими забруднювачами атмосферного повітря зі штучних джерел є продукти спалювання сірковмісного палива (вугілля, нафтопродуктів, газу), вихлопні гази автотранспорту, радіоактивне забруднення, пестициди та інсектициди. Хімічний склад техногенних викидів в атмосферу залежить від виду палива, способу спалювання, складу виробничої сировини, технології виробництва та ін.

Щорічно при спалюванні палива викидається понад 700 млн.т пилу та різних газоподібних сполук. Все це призвело до накопичення в атмосфері антропогенних забруднювачів: оксиду (CO) та діоксиду (CO_2) карбону, метану, оксидів нітрогену, діоксиду сульфуру, озону, фреонів тощо. Вони суттєво впливають на глобальний клімат, викликаючи такі негативні наслідки як “парниковий ефект”, виснаження “озонового шару Землі”, випадання “кислотних опадів”, утворення “фотохімічного смогу”, зниження прозорості атмосфери, послаблення здатності атмосфери до самоочищення.

Особливо небезпечні викиди, які утворюються при роботі різних видів транспорту, зокрема автомобілів, вихлопні гази яких містять шкідливі домішки. Концентрація цих домішок у вихлопних газах залежить від типу двигуна, особливостей його обслуговування, своєчасного ремонту систем живлення і запалювання, стану доріг. Від кожної тисячі автомобілів за день надходить у повітря більше 3000 кг оксиду вуглецю, інших продуктів неповного згоряння палива, які негативно впливають на здоров'я людей і тварин, зокрема токсичний чадний газ (оксид вуглецю двовалентного). В Україні щороку автотранспорт викидає в атмосферне повітря 2000 тис. т забруднюючих речовин, що становить 31% від загального обсягу викидів, у т.ч. понад 63% свинцю, 54 – оксиду вуглецю, 36 – вуглеводнів та 25% – оксидів азоту.

Задимленість атмосфери вокзалів та прилеглих територій спричиняють паровози та тепловози. Переведення тяги на електричну помітно знизило отруєння повітря шкідливими газами. Локальне забруднення повітря зумовлюють також морські та річкові судна, які працюють на вугіллі та інших видах важкого палива.

Забруднені шкідливими газами території аеродромів. Сучасні літаки, які літають на значній висоті, можуть зруйнувати озоновий шар, в результаті чого відкриється доступ пагубним ультрафіолетовим променям Сонця, що може призвести до небажаних наслідків.

Забруднюють атмосферне повітря промислові викиди, які залежать від видів палива (твердого, рідкого, газоподібного) і способів їх спалювання, різні за хімічним складом. Спалювання вугілля, газу, нафти з різних причин рідко буває повним. Тому промисловість викидає в атмосферу значну кількість твердих часток (сажа, зола, пил) та шкідливих газів (оксиди вуглецю, вуглеводні, оксиди азоту). Такі частки палива, а також різні розпилені продукти (цемент, фосфорити) утворюють промисловий пил. Він складається з дрібних часточок і довго тримається в повітрі у зваженому стані. Забруднення повітряного басейну сірчаним газом і пилом спричиняють теплові електростанції, які працюють на вугіллі. Перехід ТЕС на газ помітно зменшує шкідливі викиди.

Підприємства хімічної, енергетичної, металургійної, нафтопереробної, цементної промисловості теж викидають у повітря велику кількість газоподібних речовин, золи та пилу. Шкідливі гази і промисловий пил накопичуються здебільшого над містами (в 1 см³ міського повітря кількість пилинок сягає 100 тис. штук).

В Україні в середньому викидається зі стаціонарних джерел 4156,3 тис. т забруднюючих речовин. В останні десятиліття у зв'язку зі спадом промислового виробництва обсяги промислових викидів суттєво знизилися.

Великої шкоди завдає радіоактивне забруднення атмосфери. Радіоактивні речовини потрапляють в атмосферу в результаті природної і штучної радіоактивності, пов'язаної з роботою атомних установок, використанням радіонуклідів у народному господарстві, внаслідок аварійних ситуацій на підприємствах ядерного циклу, атомних вибухів. Природна радіоактивність притаманна атмосфері, вона присутня постійно і не залежить від діяльності людини. Живі організми пристосувалися до неї, і вона не викликає шкідливих наслідків, на відміну від штучної. Особливо загрозливим є надходження радіоактивних речовин в атмосферу внаслідок аварій атомних установок, оскільки радіоактивне опромінення скорочує життя людини, спричиняє пухлини кісток, лейкемію, розлад нервової системи, порушення генетичної основи організму. Проблемою є утилізація радіоактивних відходів. На сьогодні найоптимальнішим вважається захоронення радіоактивних відходів у покинутих соляних шахтах або у спеціальних сховищах у товщі соляного шару, куди не проникає вода, але це не може гарантувати повної безпеки.

Відхідні гази будь-яких промислових підприємств розсіюються в атмосфері. Найбільше значення для розсіювання шкідливих речовин має тропосфера. Знаючи її особливості, умови викиду шкідливих речовин в атмосферу, кліматичні, погодні та географічні фактори можна легко прогнозувати (на основі математичного моделювання) зону розповсюдження забруднень.

Загальна маса світових промислово-побутових викидів становить приблизно 600 гігатон (Гт) на рік. За останні 100 років в атмосферу надійшло 1,55 мегатонн (Мт) кремнію, 1,5 Мт миш'яку, більше ніж по 1 Мт нікелю та кобальту, по 0,6 Мт цинку і сурми. Про динаміку викидів забруднюючих речовин зі стаціонарних

джерел за основними видами економічної діяльності свідчать дані табл.1.3.

Таблиця 1.3

Динаміка викидів забруднюючих речовин зі стаціонарних джерел за основними видами економічної діяльності

Вид економічної діяльності	Тверді речовини		SO ₂		NO _x		Вуглеводні, ЛОС		CO	
	1997	1998	1997	1998	1997	1998	1997	1998	1997	1998
Всі види економічної діяльності	785,9	749,1	1136,4	1023,0	370,5	332,9	461,8	427,4	1366,1	1279
Сільське господарство, мисливство та пов'язані з ними послуги	4,1	3,2	3,1	2,3	1,4	1,1	0,7	0,5	4,4	3,6
Добувна промисловість	98,2	91,4	72,6	65,8	16,6	14,8	345,5	314,4	294,8	257,6
Обробна промисловість	246,8	224,6	226,6	288,5	113,7	99,9	73,0	65,1	940,6	890,2
Виробництво електроенергії, газу та води	396,0	385,6	780,6	718,3	209,0	187,7	4,3	2,2	71,6	79,0
Будівництво	8,1	7,8	16,9	15,2	5,4	4,7	2,1	11,4	7,0	7,3
Інші види економ, діяльності	32,7	36,5	36,6	32,9	24,4	24,7	36,2	33,8	47,7	41,2

Нераціональна промислово-побутова діяльність нерідко призводить до локальних та регіональних екологічних криз (високе забруднення атмосферного повітря Донецького і Придністровського регіонів України, смоги (димові тумани) в Лос-Анджелесі, Нью-Йорку, Чикаго, Токію, Мілані), у ній закорінені і глобальні екологічні проблеми, які тривожать усе людство: потепління клімату, кислотні опади, руйнування озонового екрана атмосфери та запустелювання.

1.5. Основні хімічні домішки, що забруднюють атмосферу

Як відомо розрізняють природні домішки, обумовлені природними процесами, і антропогенні, такі, що виникають в результаті господарської діяльності людства (рис. 1.2). Рівень забруднення атмосфери домішками від природних джерел є фоновим і має малі відхилення від середнього рівня в часі.

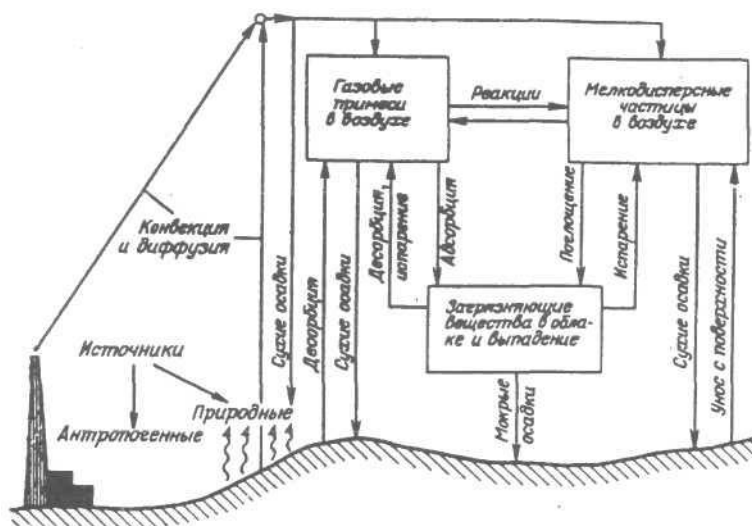


Рис. 1.2. Схема процесів викидів речовин в атмосферу і трансформації початкових речовин в продукти з подальшим випаданням у вигляді опадів

Антропогенні забруднення відрізняються різноманіттям видів домішок і численністю джерел їх викиду. Найбільш стійкі зони з підвищеними концентраціями забруднень виникають в місцях активної життєдіяльності людини. Встановлено, що кожні 10...12 років об'єм світового промислового виробництва подвоюється, а це супроводжується приблизно таким же зростанням об'єму забруднень, що викидаються, в навколишнє середовище. По ряду забруднень темпи зростання їх викидів значно вище середніх. До таких відносяться аерозолі важких і рідкісних металів, синтетичні з'єднання, що не існують і не утворюються в природі, радіоактивні, бактеріологічні і інші забруднення.

Домішки поступають в атмосферу у вигляді газів, пари, рідких і твердих частинок. Гази і пари утворюють з повітрям суміші, а рідкі і тверді частинки – аерозолі (дисперсні системи), які поділяють на пил (розміри частинок більше 1 мкм), дим (розміри твердих частинок менше 1 мкм) і туман (розмір рідких частинок менше 10 мкм). Пил, у свою чергу, може бути крупнодисперсний (розмір частинок більше 50 мкм), середньодисперсний (50... 10 мкм) і дрібнодисперсний (менше 10 мкм). Залежно від розміру рідкі частинки підрозділяються на супертонкий туман (до 0,5 мкм), тонкодисперсний туман (0,5...3,0 мкм), грубодисперсний туман (3...10 мкм) і бризки (понад 10 мкм). Слід зазначити, що аерозолі часті полідисперсні, тобто містять частинки різного розміру.

Основними хімічними домішками, що забруднюють атмосферу, є наступні.

Оксид вуглецю (CO) – безбарвний газ, що не має запаху, відомий також під назвою «чадний газ». Утворюється в результаті неповного згорання викопного палива (вугілля, газу, нафти) в умовах недоліку кисню і при низькій температурі. При цьому 65% від всіх викидів доводиться на транспорт, 21% – на дрібних споживачів і побутовий сектор, а 14% – на промисловість. При вдиханні чадний газ за рахунок наявного в його молекулі потрійного зв'язку (C=O) утворює міцні комплексні з'єднання з гемоглобіном крові людини і тим самим блокує надходження кисню в кров. Це викликає головні болі, нудоту, а при вищій концентрації смерть.

При 14 мг/м³ зростає вірогідність смерті від інфаркту міокарду. Такі екстремальні концентрації часто спостерігаються в районах підвищеного антропогенного навантаження на навколишнє середовище: у годинник списів на транспорті або при інверсіях (тобто в умовах слабого повітряного обміну), що сприяють виникненню смогу. Зменшення викидів чадного газу досягається шляхом допалювання газів, що відходять, і використання альтернативних джерел палива.

Діоксид вуглецю (CO₂), або вуглекислий газ, – безбарвний газ з кислуватим запахом і смаком, продукт повного окислення вуглецю. Є одним з парникових газів.

Діоксид сірки (SO₂) (сірчистий ангідрид) – безбарвний газ з різким запахом. Утворюється в процесі згорання сірковмісних викопних видів палива, в основному вугілля, а також при переробці сірчистих руд. Він в першу чергу бере участь у формуванні кислотних дощів. Загальносвітовий викид S₂ оцінюється в 190 млн т в рік. Концентрація діоксиду сірки особливо велика в районах, де розташовані крупні теплові станції, металургійні і горнообогатительні заводи.

Тривала дія діоксиду сірки на людину приводить спочатку до втрати смакових відчуттів, обмеженого дихання, а потім – до запалення або набряку легенів, перебоїв

в серцевій діяльності, порушення кровообігу і зупинки дихання. Рослини набагато чутливіше до дії діоксиду сірі, чим людина. Так, листові пластинки рослин, що виростають на відстані менше 1 км. від підприємств, що викидають діоксид сірі, зазвичай густо усіяні дрібними некротичними плямами, що утворилися в місцях осідання крапель сірчаної кислоти.

Оксиди азоту (оксид і діоксид азоту) – газоподібні речовини: монооксид азоту NO і діоксид азоту NO₂ об'єднуються однією загальною формулою NO_x. При всіх процесах горіння утворюються оксиди азоту, причому переважно у вигляді оксиду. Оксид азоту досить швидко окислюється до діоксиду, який є червоно-білим газом з неприємним запахом, що сильно діє на слизисті оболонки людини. Чим вище температура згорання, тим інтенсивніше йде утворення оксидів азоту.

Іншим джерелом оксидів азоту є підприємства, що проводять азотні добрива, азотну кислоту і нітрати, анілінові фарбники, нітросполуки, віскосний шовк, целулоїд. Кількість оксидів азоту, що поступають в атмосферу, складає 65 млн т в рік. Від загальної кількості оксидів азоту, що викидаються в атмосферу, на транспорт доводиться 55%, на енергетику – 28%, на промислові підприємства – 14%, на дрібних споживачів і побутовий сектор – 3%.

У літній період при інтенсивному сонячному опромінюванні тривалістю 12...14 год унаслідок високої розчинності у воді (хмари, дощ) і сорбції на зволжених поверхнях азотна кислота швидко випадає на земну поверхню. У містах найбільш високі концентрації оксидів азоту спостерігаються вранці, до початку фотохімічних процесів. При яскравому сонячному світлі оксиди азоту реагують з незгорілими бензиновими парами і іншими вуглеводнями, утворюючи низькоатмосферний озон, або зміг, тобто червоно-бурий серпанок.

При концентраціях понад 0,15 мг/м³ виникають гострі захворювання органів дихання. При гострому отруєнні діоксидом азоту може розвинутися набряк легенів. Ознаками хронічного отруєння є головні болі, безсоння, роздратування слизових оболонок.

Озон (O₃) – газ з характерним запахом, сильніший окислювач, ніж кисень. Його відносять до найбільш токсичним зі всіх звичайних домішок, що забруднюють повітря. У нижньому атмосферному шарі озон утворюється в результаті фотохімічних процесів за участю діоксиду азоту і летких органічних сполук (ЛОС). До ЛОС відносять близько 260 хімічних сполук. При утворенні озону виходять суміші із ЛОС, що складаються з сотень хімічних речовин, названі фотохімічним “смогом”. Найбільш високі концентрації озону спостерігаються в промислових районах. Проте, оскільки емісії діоксиду азоту і ЛОС почастишали навіть в сільській місцевості, то і тут зафіксовані підвищені концентрації озону.

Вуглеводні – хімічні сполуки вуглецю і водню. До них відносять тисячі різних речовин, що забруднюють атмосферу, містяться в незгорілому бензині, рідинах, вживаних в хімічистці, промислових розчинниках і так далі. Багато вуглеводнів небезпечні самі по собі. Наприклад, бензол, один з компонентів бензину, може викликати лейкемію, а гексан – важкі поразки нервової системи людини. Бутадієн є сильним канцерогеном.

Свинець (Pb) – срібlisto-сірий метал, токсичний в будь-якій відомій формі. Широко використовується для виробництва припою, фарб, боеприпасів, друкарського сплаву і тому подібне. Близько 60% світової здобичі свинцю, яка

складає близько $4 \cdot 10^7$ т, щорічно витрачається для виробництва кислотних акумуляторів. Проте основним джерелом (близько 80%) забруднення атмосфери з'єднаннями свинцю є вихлопні гази транспортних засобів, в яких використовується етилирований бензин, в який як антидетонаційну присадку вводять тетраетилсвинець.

Свинець і його з'єднання, потрапляючи в організм людини, знижують активність ферментів і порушують обмін речовин, крім того, вони володіють кумулятивною дією, тобто здатністю накопичуватися в організмі людини. Особливо серйозну загрозу з'єднання свинцю представляють для дітей до шести років. У організмі дитини залишається до 40% з'єднань свинцю, що потрапили в нього, а це порушує розумовий розвиток, уповільнює зростання, погіршує слух і мову дитини і позбавляє його здібності зосередитися.

Фреони – група галогеносодержащих речовин, синтезованих людиною. Їх перевагою перед іншими речовинами є те, що вони не горючі, не токсичні і нейтральні. Фреони, що є хлорованими і фторованими вуглецьми (ХФВ), які широко використовуються в якості холодагентів в холодильниках і кондиціонерах, піноутворюючих агентів, в установках для газового пожежегасіння, робочого тіла аерозольних упаковок (лаків, дезодорантів і т.д.), оскільки недорогі і нетоксичні гази.

Промисловий пил залежно від механізму утворення підрозділяється на наступних 4 класи:

- механічний пил – утворюється в результаті подрібнення продукту в ході технологічного процесу;
- перегони – утворюються в результаті об'ємної конденсації пари речовин при охолодженні газу, що пропускається через технологічний апарат, установку або агрегат;
- летка зола – що міститься в димовому газі в зваженому стані залишок палива, що не згорає, утворюється з його мінеральних домішок при горінні;
- промислова сажа – вхідний до складу промислового викиду твердий високодисперсний вуглець, утворюється при неповному згоранні або термічному розкладанні вуглеводнів.

Основний параметр, що характеризує зважені частинки, – це їх розмір, який коливається в широких межах, – від 0,1 до 850 мкм. З цієї гамми найбільш небезпечні частинки від 0,5 до 5 мкм, оскільки вони не осідають в дихальних шляхах і саме їх видихає людина.

Основними джерелами антропогенних аерозольних забруднень повітря є теплоелектростанції (ТЕС), споживаючі вугілля високої зольності, збагачувальні фабрики, металургійні, цементні, магнезитові і інші заводи. Аерозольні частинки від цих джерел відрізняються великою хімічною різноманітністю. Найчастіше в їх складі виявляються з'єднання кремнію, кальцію і вуглецю, рідше – оксиди металів: заліза, магнію, марганцю, цинку, міді, нікелю, свинцю, сурми, вісмуту, селену, миш'яку, берилія, кадмію, хрому, кобальту, молібдену, а також азбест. Ще більша різноманітність властива органічному пилу, що включає аліфатичні і ароматичні вуглеводні, солі кислот. Вона утворюється при спалюванні залишкових нафтопродуктів, в процесі піролізу на нафтопереробних, нафтохімічних і інших подібних підприємствах.

До постійних джерел аерозольного забруднення відносяться промислові відвали – штучні насипи з перевідкладеного матеріалу, переважно здрібнених порід, що утворюються при видобутку корисних копалин або ж з відходів підприємств переробної промисловості, ТЕС. Виробництво цементу і інших будівельних матеріалів також є джерелом забруднення атмосфери пилом.

Спалювання кам'яного вугілля, виробництво цементу і виплавка чавуну дають сумарний викид пилу в атмосферу, рівний 170 млн т/рік.

Значна частина аерозолів утворюється в атмосфері при взаємодії твердих і рідких частинок між собою або з водяною парою.

До небезпечних чинників антропогенного характеру, сприяючих серйозному погіршенню якості атмосфери, слід віднести її забруднення радіоактивним пилом. Так, при ядерних вибухах або аваріях на АЕС велика частина радіонуклідів утворюється в результаті ділення урану-235, урану-238 і плутонію-239. Встановлено, що через декілька десятків секунд після вибуху утворюються приблизно 100 різних радіонуклідів, 29 з яких вносить найбільший внесок до радіоактивного забруднення атмосфери за годину, 20 – через дві доби, а 3 – через 100 років. Особливу потенційну небезпеку для людини і тварин представляє стронцій-90 не тільки як довгоживучий елемент, але і як аналог кальцію, здатний замінювати його в кістках.

Під час ядерних вибухів радіонукліди знаходяться в газоподібному стані і у міру пониження температури конденсуються в аерозольну хмару. Найбільш крупні частинки (діаметром більше 40 мкм) випадають з атмосфери і осідають на земній поверхні. Дрібні ж частинки (діаметром від 1 до 20 мкм) потрапляють не тільки у верхні шари тропосфери, але і в стратосферу, обумовлюючи так зване глобальне забруднення, що супроводжується випаданням радіонуклідів в межах обох півкуль.

Слід зазначити, що час перебування дрібних частинок в нижньому шарі тропосфери складає в середньому декілька діб, а у верхньому – 20...40 діб. Що стосується частинок, що потрапили в стратосферу, то вони можуть знаходитися в ній до року, а іноді і більше.

1.6. Наслідки забруднення атмосфери

1.6.1. Зміна природного складу і параметрів атмосфери

Найбільшою мірою на процеси життєдіяльності на Землі впливає зміна кисневого балансу і підвищення концентрації вуглекислого газу. Це веде до двох прогнозованих наслідків: браку кисню і парникового ефекту.

Брак кисню обумовлений, з одного боку, скороченням його надходження з природних джерел, а з іншої – неухильним збільшенням його споживання. Основними причинами скорочення надходження кисню в атмосферу є інтенсивне забруднення поверхневих вод Світового океану і зменшення загальної площі лісових масивів. Встановлено, що водна поверхня океану регенерує близько 50% атмосферного кисню.

Збільшення споживання кисню пов'язане:

- із зростанням населення земної кулі, оскільки за добу при диханні чоловік через свої легені пропускає до 120...150 м³ повітря;

- з широким впровадженням технологічних процесів, в яких окислювальні реакції здійснюються за рахунок атмосферного кисню.

За останніх 25...30 років транспорт і промисловість узяли з атмосфери більше кисню, чим використано людством за весь історичний період існування цивілізації. Так, авіалайнер при трансатлантичному перельоті спалює близько 100 т кисню, а в США автомобілі споживають кисню в 2 рази більше, ніж його регенерує природа на всій їх території. На всю техногенну діяльність людство витрачає 30...40 млрд т кисню в рік.

Порушення кисневого балансу матиме глобальні наслідки. Підраховано, що при 5%-ному щорічному прирості споживання вільного кисню на технологічні потреби більш ніж через 100 років його вміст в гомосфері може знизитися до критичної для людини межі – до 17% (по масі). І тоді людству необхідно буде шукати ефективні способи отримання вільного кисню з мінералів земної кори.

Потепління клімату. Зміни клімату в історичній ретроспективі вивчають методом глибинного зондування вічних льодовиків. В Антарктиді його проводили до глибини 2 км, що охоплює останні 160 тис. років. Доведено, що протягом історії Землі клімат суттєво змінювався, але до початку розвитку людської цивілізації такі процеси були поступовими. Тільки у другій половині ХХ ст. клімат почав швидко трансформуватися внаслідок дії антропогенних чинників.

Потепління клімату зумовлене тепличним ефектом, який на 46% є результатом виробництва енергії (спалювання викопного палива з викидами в атмосферу вуглекислого газу), на 24% – забруднення атмосфери іншими хімічними речовинами, зокрема метаном, на 18% – вирубкою лісів та ерозією ґрунту, від чого знижується інтенсивність біологічного зв'язування вуглекислого газу, на 9% – інтенсифікацією сільського господарства, з якою пов'язане надходження до атмосфери підвищеної кількості оксидів азоту, на 3% – спалюванням сміття.

Вуглекислий газ, як й інші тепличні гази, має здатність утримувати теплове випромінювання біля поверхні планети, що зумовлює підвищення температури. Викиди його щороку зростають. Лише протягом 1950-1990 рр. кількість цього газу в атмосфері збільшилася на 30%. Неминучим наслідком збільшення викидів в атмосферу антропогенного вуглекислого газу є потепління клімату, оскільки океан не може поглинути весь газ. У другій половині ХХ ст. середньорічна температура повітря підвищувалася кожні 10 років на 0,3°C. За даними спеціалістів ООН, до 2100 р. ця температура зросте на 3°C.

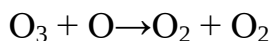
Потепління клімату може спричинити зміну режиму погоди на території великих регіонів планети, суттєво вплинути на сільськогосподарське виробництво. Внаслідок потепління почнеться танення льоду Антарктики, Арктики та високогір'їв, неминучим наслідком буде підвищення рівня Світового океану. За прогнозами, до 2100 р. його рівень підніметься приблизно на 65 см, а за деякими іншими даними – на 3,45 м, що може спричинити глобальну катастрофу.

За підрахунками спеціалістів ООН, економічні збитки від майбутнього потепління клімату можуть бути оцінені в 10^{13} доларів. Людство не має таких ресурсів. Запобігти швидкому потеплінню клімату можна, передусім скоротивши викиди тепличних газів. На це орієнтує прийнята у 1988 р. Резолюція ООН "Охорона глобального клімату для сучасності та майбутніх поколінь людства".

Руйнування озонового екрана атмосфери. Озоновий шар, який знаходиться в

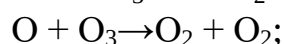
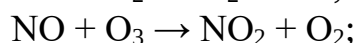
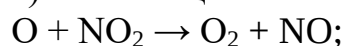
атмосфері на висоті 12...23 км, захищає поверхню планети від жорсткої ультрафіолетової радіації з довжиною хвилі 320...400 нм. Процес руйнування озону в атмосфері ініціюється різними речовинами. Як стверджують американські вчені, такими речовинами є хлор, бромпохідні (фреон), тетрахлорид вуглецю, метилхлороформ та ін. Найбільшої шкоди завдають фреони, які широко застосовуються в холодильних установках, в аерозольних балончиках та миючих засобах.

Озон атмосфери руйнується в результаті природного розпаду (кисневий цикл, або цикл Чепмена):

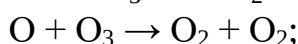
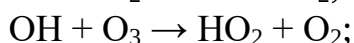
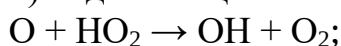


Ця реакція відбувається дуже повільно, але може прискорюватись за наявності з'єднань азоту, водню та хлору, які діють як каталізатори. Реакції азотного, водневого та хлорного циклів є такими:

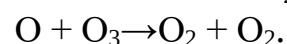
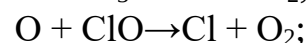
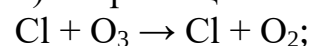
а) азотний цикл:



б) водневий цикл:

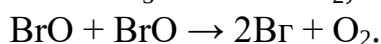
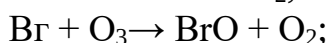
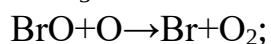
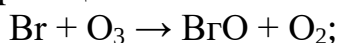


в) хлорний цикл:

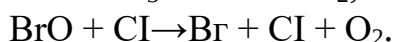
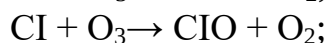
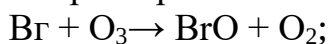


Найімовірніше вони на висоті 20...40 км. Концентрації каталізаторів в 1000 разів менші від концентрації озону, кількість циклів руйнування на одну молекулу каталізатора становить від 10² до 10⁷. Дія різних каталітичних циклів залежить від висоти (вище 35 км – хлорний цикл, нижче – азотний).

Ще ефективнішим каталізатором руйнування озону є бром, за участю якого можуть відбуватися такі цикли реакцій:



Один атом броду може зруйнувати десятки тисяч молекул озону. За наявності броду і хлору цикли мають такий характер:



На руйнування озону стратосфери певною мірою впливають викиди продуктів згоряння палива космічної і ракетної техніки. Забруднюють високі шари атмосфери оксидами азоту сучасні надзвукові літаки.

Дослідження озонового шару почалися у 1930 р. Згодом вони були розширені, а для ведення спостережень була створена спеціальна мережа станцій (“мережа Добсон”). Вимірювання кількості стратосферного озону протягом 1980-1991 рр. з канадського супутника “Німбус-7” засвідчили, що швидкість руйнування озону становить 0,224% на рік. За оцінками НАСА (США), з 1978 по 1990 рік його кількість в озоновому екрані скоротилася на 45%. Через зменшення товщі озонового екрана та розриви в ньому зростає кількість ультрафіолетового випромінювання, що досягає поверхні Землі (за останні 10 років – на 10%, а в Антарктиді, де стійко зберігається озонова діра, – на 40%). Невелику озонову діру виявлено у Північній півкулі над Шпіцбергенем. Її поява спричинила зростання ультрафіолетового фону на територіях, розташованих поблизу.

За даними “Грінпіс”, зменшення товщі озонowego шару на кожні 10% спричинює збільшення кількості випадків захворювання раком шкіри на 300 тис. випадків, є однією з причин захворювання катарактою очей. Підвищене ультрафіолетове опромінення знижує імунітет, через що стають частішими і важчими інфекційні захворювання людей та сільськогосподарських тварин.

В Україні стан озонowego екрана над її територією контролюють 6 спеціальних станцій (у Києві, Одесі, Борисполі, Богуславі, Львові та Феодосії). За їх даними, з 1980 р. озонový екран над Україною стає менш потужним. Тому Україна приєдналася до Конвенції 1985 р. з охорони озонowego екрана, зменшення кількості викидів і виробництва фреонів, інших речовин, що руйнують озон.

1.6.2. Кислотні опади

Кислотними називають будь-які види опадів (дощ, сніг, туман), рН (від’ємний логарифм концентрації водневих йонів) яких нижче 7, тобто опади, які мають кислу реакцію. Реєструють динаміку кислотності атмосферної води за кислотністю льоду в Антарктиді, Гренландії та Альпах. У 20-ті роки ХІХ ст. рН дощової води була на рівні 7, тобто нейтральною. Кислотні дощі вперше зареєстровані в 1972 р. в англійському місті Манчестер. Основною причиною їх випадання було надходження до атмосфери оксидів азоту та сірки. Приблизно дві третини кислотних дощів зумовлені діоксидом сірки. Третина, що залишилася, обумовлена в основному оксидами азоту, які також служать однією із причин парникового ефекту і входять до складу міського смогу.

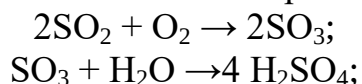
Промисловість різних країн щорічно викидає в атмосферу більше 120 млн т діоксиду сірі, який, реагуючи з атмосферою вологою, перетворюється на сірчану кислоту. Потрапляючи в атмосферу, ці забруднювачі можуть розноситися вітром на тисячі кілометрів від джерела і повертатися на землю з дощем, снігом або туманом. Вони перетворюють озера, річки і ставки в «мертві» водоймища, знищуючи в них практично все живе – від риб до мікроорганізмів і рослинності, гублять ліси, руйнують споруди і пам’ятники архітектури. Багато тварин і рослини не можуть вижити в умовах підвищеної кислотності. Кислотні дощі не тільки викликають підкислення поверхневих вод і верхніх горизонтів ґрунтів, але і розповсюджуються з низхідними потоками води на весь ґрунтовий профіль і викликають значне підкислення ґрунтових вод.

Сірка міститься в таких корисних копалинах, як вугілля, нафта, мідні і залізні руди, при цьому одні з них використовуються як паливо, а інші переробляються в хімічній і металургійній промисловості. При переробці сірка перетворюється на різні хімічні сполуки, серед яких переважають діоксид сірі і сульфати. З’єднання, що утворилися, частково уловлюються очисними пристроями, їх частина, що залишилася, викидається в атмосферу.

Сульфати утворюються при спалюванні рідких палив і в ході таких промислових процесів, як нафтопереробка, виробництво цементу і гіпсу, а також сірчаної кислоти. При спалюванні рідких палив утворюється близько 16% загальної кількості сульфатів.

Хоча кислотні дощі не створюють таких проблем світового масштабу, як глобальне потеплення клімату і виснаження озонowego шару, їх дія позначається далеко за межами країни, що створює це забруднення.

За наявності в повітрі оксиду азоту (IV) N_2O і водяної пари ультрафіолетове випромінювання Сонця зумовлює такі хімічні перетворення SO_2 :



а також



Кислотні дощі і водоймища. Як правило, рН більшої частини річок і озер складає 6...8, але при високому вмісті в їх водах мінеральних і органічних кислот рН значно нижче. Процес попадання кислотних дощів у водоймища (річки, ставки, озера і водосховища) включає багато етапів, на кожному з яких їх рН може і зменшуватися і зростати. Наприклад, зміна рН опадів можлива при їх русі після лісової підстилки, взаємодії з мінералами, продуктами діяльності мікроорганізмів.

Все живе чутливо до зміни рН, тому підвищення кислотності водоймищ наносить непоправна шкода рибним запасам. У Канаді, наприклад, із-за частих кислотних дощів більше 4 тис. озер оголошено мертвими, ще 12 тис. – на межі загибелі. Порушена біологічна рівновага 18 тис. озер в Швеції. У половині озер південної частини Норвегії зникла риба.

Через загибель фітопланктону сонячне світло проникає на більшу глибину ніж зазвичай. Тому всі померлі від кислотних дощів озера вражають прозорі і незвичайно блакитні.

Кислотні дощі і ліси. Величезну втрату кислотні дощіносять лісам, садам, паркам. Обпадає листя, молоді втечі делаются крихкими, як скло, і гинуть. Деревастають більш схильними до дії хвороб і шкідників, відмирає до 50% їх кореневої системи, головним чином дрібне коріння, що живить дерево. У ФРН кислотними дощами вже погублена майже третина всіх ялин. У таких лісистих районах, як Баварія і Баден, постраждала до половини лісових угідь. Кислотні дощіносять втрату не тільки лісам, розташованим на рівнинах, ряд пошкоджень зареєстрований у високогірних лісах Швейцарії, Австрії, Італії.

Кислотні дощі і врожайність сільськогосподарських культур. Встановлено, що наслідки дії на сільськогосподарські культури кислотних дощів визначаються не тільки їх кислотністю і катіонним складом, але і тривалістю, а також температурою повітря. У загальному випадку встановлено, що залежність зростання і дозрівання сільськогосподарських культур від кислотності опадів свідчить про взаємозв'язок фізіології рослин, розвитку мікроорганізмів і ряду інших чинників. Звідси очевидно, що необхідний кількісний облік всіх компонентів кислотних дощів, що впливають на врожайність і якість продукції, а також на складні процеси функціонування ґрунтової біоти для кожного конкретного регіону.

Кислотні дощі і матеріали. Вплив кислотних дощів на широку гамму конструкційних матеріалів стає з року в рік все очевидніше. Так, прискорена корозія металів під впливом кислотних опадів, як відзначає американський друк, приводить до загибелі літаків і мостів в США. Серйозною проблемою, як відомо, стало збереження античних пам'яток в Греції і Італії. Основними ушкоджувальними інгредієнтами є катіон водню, діоксид сірки, оксиди азоту, а також озон, формальдегід і пероксид водню.

Інтенсивність руйнування матеріалів залежить: від їх пористості, оскільки чим вище питома поверхня, тим більше її сорбційна здатність; від конструкційних

особливостей, оскільки за наявності різних виїмок вони є колекторами кислотних опадів; від умов експлуатації: швидкості вітру, температури, вологості повітря і тому подібне.

На практиці найбільшу увагу приділяють трем групам матеріалів: з металів – неіржавіючій сталі і оцинкованому залізу; з будівельних матеріалів – матеріалам для зовнішніх конструкцій будівель; із захисних – фарбам, лакам і полімерам для поверхневих покриттів. При дії опадів і газів їх ушкоджувальна дія обумовлена інтенсивністю каталітичних реакцій за участю металів, а також синергізмом, при цьому найчастіше спостерігається рівномірна корозія.

За даними Європейського парламенту, економічний збиток від кислотних опадів складає 4% валового національного продукту. Це повинно враховуватися при виборі стратегії боротьби з кислотними дощами в довгостроковій перспективі.

Конкретні заходи по зменшенню викидів сірі в атмосферу реалізуються в двох напрямках:

- використання на ТЕЦ вугілля з низьким змістом сірки;
- очищення викидів.

Малосірчистим вважається вугілля із змістом сірі менше 1%, а високосірчистими – із змістом сірі більше 3%. Щоб зменшити вірогідність утворення кислотних дощів, високосірчисте вугілля піддає попередній обробці. До складу вугілля зазвичай входять піритова і органічна сірка. Сучасні багатостадійні методи очищення вугілля дозволяють витягувати з нього до 90% всієї піритової сірки, тобто до 65% загальної кількості її. Для видалення органічної сірки в даний час розробляються методи хімічного і мікробіологічного очищення.

Аналогічні методи необхідно застосовувати і до високосірчистої нафти. Світові запаси нафти з низьким змістом сірки (до 1%) невеликі і складають не більше 15%.

При спалюванні мазуту з високим вмістом сірки використовують спеціальні хімічні присадки, які дозволяють понизити зміст діоксиду сірі у викидах.

Одним з найбільш простих способів зниження кількості оксидів азоту при спалюванні палива є проведення процесу в умовах надлику кисню, що забезпечується швидкістю подачі повітря в зону горіння. У Японії розроблена технологія “допалювання” первинних продуктів згорання. При цьому спочатку паливо (нафта, газ) спалюють в оптимальному режимі для утворення оксидів азоту, а потім в зоні допалювання знищують паливо, що не прореагувало. При цьому реакції, що приводять до відновлення оксидів, і їх викид знижуються на 80%.

Наступним напрямом у вирішенні цієї проблеми є відмова від практики розсіювання газоподібних викидів. Їх слід не розсіювати, сподіваючись на величезні масштаби атмосфери, а, навпаки, уловлювати і концентрувати.

Найбільш ефективний спосіб очищення викидів від діоксиду сірки заснований на реакції його з подрібненим вапном. В результаті реакції 90% діоксиду сірки зв’язується з вапном, утворюючи гіпс, який можна використовувати в будівництві. Так, теплоелектроцентральної потужністю 500 Мвт, забезпечена установкою для очищення викидів, дає за рік 600 тис. м³ гіпсу.

Перспективною мірою по зниженню шкідливих дій є встановлення лімітів на викиди. Так, Агенство з довкілля охорони США встановило ліміт загального викиду діоксиду сірки на території країни, передбачивши його щорічне зниження. Цей захід дав певний позитивний ефект.

1.6.3. Запустелювання

Сутність цього явища полягає у виснаженні аридних та напіваридних екосистем під впливом діяльності людини та посух. Запустелювання відбувається здебільшого в посушливих зонах. Воно проявляється в деградації природних біомів (сукупностей біоценозів, видів рослин і тварин однієї природної зони, для яких характерні певні типи структур угруповання, що є наслідком адаптації виду до умов середовища) і зниженні родючості ґрунтів. Території, які зазнали запустелювання, не здатні самовідновлюватися. Натепер пустелі займають вже 4 млрд 616 млн. га. Щорічно площа пустель зростає на 60 тис км².

Людство вперше зіткнулося з цим явищем на великих територіях в 1968-1973 рр., коли запустелювання південного району Сахари спричинило голод серед місцевого населення. Аналогічний процес відбувався і в районі Аральського моря. Аральська катастрофа завершилася аридизацією клімату на великій території. Наслідки її поширилися на південь від Аралу на 100...400 км. На віддалі до 250 км від Аралу рівень ґрунтової води знизився на 5 м. Ці масштабні регіональні катастрофи, як і немало інших, спричинені господарською діяльністю людини.

Отже, антропогенне забруднення атмосферного повітря порушує безпечну життєдіяльність людини, призводить до погіршення здоров'я людей, негативно впливає на стан біоценозів, зменшуючи їх продуктивність та породжуючи процеси деградації екологічних систем. Людство повинно докласти максимальних зусиль, щоб зупинити ці негативні процеси і не допустити виникнення нових.

1.6.4. Забруднення атмосфери біологічними домішками

Біологічні домішки поділяють на патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, гриби і так далі) і мікроорганізми (рослини і тварини). До перших відносять живі істоти, розміром менше 500 мкм.

Забруднення атмосфери біологічними домішками пов'язане як з масовою появою самих мікроорганізмів, так і з впливом їх на людину, в першу чергу на імунну систему.

Імунна система людини еволюціонувала впродовж мільйонів років, адекватно реагуючи на нові бактерії і штами вірусів. Але це екологічна рівновага людини з навколишнім середовищем починає все більше порушуватися, і тут виділяють дві причини. Перша пов'язана з порушенням обміну речовин в організмі людини під впливом хімічних речовин, а друга – з ослабленням організму під впливом стресових ситуацій.

Навіть мікродози чужорідних хімічних речовин, проникнувши в організм людини із забрудненим повітрям, недоброякісною їжею або водою, розносяться кров'ю по органах і тканинах. Частково вони затримуються там і починають брати участь обміні речовин, спотворюючи його нормальну течію і стаючи пусковими механізмами прискореної мутації клітин, серед яких часто з'являються онкогенно небезпечні.

Дослідженнями встановлено, що з 70-х років XX ст. Україні зросла частота таких екологічно залежних захворювань, як серцево-судинні і онкологічні. До теперішнього часу накопичений великий статистичний матеріал, що встановлює

тісний кореляційний зв'язок між концентрацією нітратів в харчових продуктах (які можуть і не перевищувати встановлених ГДК) і певними захворюваннями печінки (первинний рак печінки). Ендоекологічні захворювання найбільш небезпечні для майбутніх поколінь, і це підтверджується наступними даними: всього 23% дітей залишаються здоровими до 7-річного віку, а до 17-ліття – 14%, половина хлопців призовного віку непридатна до служби в армії за станом здоров'я.

Вірус СНІДУ взагалі паралізує захисні властивості організму, і людина, його носій, стає уразливою до будь-яких захворювань.

Контрольні запитання і завдання

1. Яку роль відіграє атмосфера для існування життя на Землі?
2. Які концентричні шари виділяють в атмосфері і на якій підставі?
3. Дайте характеристику кожного шару атмосфери.
4. Що таке забруднення атмосферного повітря?
5. Які джерела забруднення атмосфери Ви знаєте?
6. За якими характеристиками поділяють види викидів в атмосферне повітря? Перерахуйте їх.
7. Назвіть основні хімічні домішки, які забруднюють атмосферу.
8. З чим пов'язана зміна природного складу і параметрів атмосфери? В чому це проявляється?
9. Що таке “кислотні дощі” і які наслідки їх випадання?
10. Поясніть сутність явища “запустелювання”.
11. Що собою являє забруднення атмосфери біологічними домішками?

Розділ 2

Нормування впливу техногенних об'єктів на атмосферне повітря

2.1. Показники нормування забруднюючих речовин в повітрі

Згідно з законом України “Про охорону атмосферного повітря”, для обмеження забруднення та можливості контролю стану повітряного середовища Міністерством охорони здоров'я (МОЗ) встановлюються гранично доступні концентрації забруднюючих атмосферу речовин. Нормативами забруднення повітря визначені граничні межі вмісту шкідливих речовин як у виробничій зоні (призначена для розташування промислових підприємств, дослідних виробництв, науково-дослідних інститутів тощо), так і у селітебній зоні (призначена для розташування житлового фонду, громадських будівель і споруд тощо) населених пунктів. Основні терміни та означення, які стосуються показників забруднення атмосферного повітря, визначені ГОСТ 17.2.1.03.

Найпоширенішою серед них є гранично допустима концентрація (ГДК).

Гранично допустима концентрація – така маса шкідливої речовини в одиниці об'єму (в мг на 1 м³ повітря, 1 л рідини чи 1 кг твердої речовини) окремих компонентів біосфери, періодичний чи постійний, цілодобовий вплив якої на організм людини, тварин і рослин не викликає відхилень у нормальному їх функціонуванні протягом усього життя нинішнього та майбутніх поколінь.

Фонова концентрація – концентрація наявних у повітрі, воді чи ґрунті шкідливих домішок на певний час на певній території.

Контроль за якістю біосфери здійснюється зіставленням фонові концентрації з гранично допустимою:

$$\frac{C_{\phi}}{ГДК} < 1$$

Загальна кількість хімічних речовин, що надходить у середовище проживання людини перевищила 4 млн. найменувань. Із них понад 40 тис. мають шкідливі для людини властивості. Нормативи ГДК, що затверджуються Міністерством охорони здоров'я України, встановлені для 600 речовин у повітряному середовищі, 200 – у водному та 100 – у ґрунті.

Усі шкідливі речовини за ступенем небезпечної дії на людину поділяються на чотири класи:

- I – надзвичайно небезпечні (нікель, ртуть);
- II – високо небезпечні (сірководень, діоксид азоту);
- III – помірно небезпечні (сажа, цемент);
- IV – мало небезпечні (бензин, фенол).

Що шкідливіша речовина, то складніше здійснити захист атмосферного повітря і то нижчий його ГДК. Для кожної речовини встановлюються два нормативи концентрації: максимальна разова і середньодобова.

Максимально разова концентрація – це найвище значення забруднювальних речовин у повітрі, отримане завдяки аналізу багаторазово відібраних проб. Поняття ГДК_{мр} використовується при встановленні науково-технічних нормативів гранично

допустимих викидів забруднюючих речовин. Максимальна разова ГДК встановлюється для відвернення рефлексорних реакцій у людини через подразнення органів дихання за короткочасного впливу (до 20 хв) атмосферних забруднень. Оскільки концентрація забруднень в атмосферному повітрі не є постійною в часі та змінюється залежно від метеорологічних умов, рельєфу місцевості, характеру викиду, разові проби повітря слід відбирати кілька разів на добу впродовж 20...30 хв. В результаті розсіювання шкідливих домішок у повітрі на межі санітарно-захисної зони підприємства концентрація шкідливої речовини в будь-який момент часу не повинна перевищувати $ГДК_{мр}$.

Середньодобова концентрація – це середньоарифметичне значення разових концентрацій у пробах атмосферного повітря впродовж 24 годин безперервно або з рівними інтервалами між відборами. Середньодобова ГДК ($ГДК_{сд}$) встановлюється для запобігання негативного впливу на людський організм протягом цілодобового використання повітря. $ГДК_{сд}$ розрахована на всі групи населення і на невизначено довготривалий період впливу, а отже, як наслідок, є найжорсткішим санітарно-гігієнічним нормативом, який встановлює концентрацію шкідливої речовини у повітряному середовищі. Саме величина $ГДК_{сд}$ може служити за “еталон” для оцінки стану повітряного середовища в селітебній зоні. Середньодобова концентрація визначається протягом доби: проби беруться 4 рази або щогодини.

При забрудненні атмосфери речовинами, для яких ГДК не визначені, МОЗ встановлює орієнтовно безпечні рівні впливу (ОБРВ).

ОБРВ – орієнтовно безпечні рівні впливу, які частіше всього визначаються розрахунковим шляхом. Для різних умов величина ГДК різна. Тому здійснюється так зване роз’єднане нормування забруднюючих речовин: для населених пунктів для атмосферного повітря встановлюються $ГДК_{ап}$ і для робочої зони встановлюється $ГДК_{рз}$.

$ГДК_{ап}$ – це максимальна концентрація домішки, віднесена до періоду усереднення, яка при періодичному впливі або протягом всього життя людини не здійснює на неї шкідливого впливу, включаючи віддалені наслідки.

$ГДК_{рз}$ – це концентрація, яка за щоденного 8-годинного перебування на роботі (не більш як 41 година на тиждень) протягом усього робочого стану не може спричинити захворювань чи відхилень у стані здоров’я людей для нинішнього та наступного покоління.

$ГДК_{тп}$ – ГДК в атмосферному повітрі найближчого населеного пункту враховує перебування людей цілодобово. Ці нормативи розроблено для недопущення викиду в атмосферу понаднормативних об’ємів шкідливих твердих речовин і їх концентрацій у атмосфері населених пунктів.

Всі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони порівнюються з максимальними разовими (протягом 30 хв), а в повітрі населеного пункту – із середньодобовими за 24 години.

$ГДК_{тп}$ – ГДК для територій підприємств – приймається рівним $0,3 ГДК_{рз}$, тобто на території підприємства необхідна більш висока кількість повітря в порівнянні з повітрям робочої зони. Природно, що $ГДК_{ап} < ГДК_{рз}$. В останньому випадку мова йде про обмежене перебування людини в забрудненій зоні, тоді як $ГДК_{ап}$ визначає безпечне перебування людини при необмеженому в часі вдиханні забруднюючої речовини. Наприклад, для діоксиду сірки $ГДК_{рз} = 10 \text{ мг/м}^3$, $ГДК_{ап} = 0,5 \text{ мг/м}^3$, $ГДК_{тп}$

буде рівне відповідно 3 мг/м³.

В умовах великих міст (з населенням більше 200 тис.чол.) та курортів $ГДК_{\text{мр}} = 0,8 \cdot ГДК_{\text{ап}}$. Для деяких видів забруднюючих речовин величини ГДК не визначені, що пояснюється багатомисливими труднощами експериментального характеру. Для таких речовин вводиться ОБРВ.

Нормування викидів забруднювальних речовин у навколишнє середовище виконується шляхом встановлення гранично допустимих викидів цих речовин в атмосферу (ГДВ).

ГДВ – кількість шкідливих речовин, яку не дозволяється перевищувати при викиді в атмосферу в одиницю часу.

Одиниця виміру ГДВ грам на секунду (1 г/с) встановлюється для кожного джерела забруднення атмосфери за умови, що викиди шкідливих речовин від цього джерела і від сукупності інших джерел з урахуванням розсіювання їх в атмосфері не створять приземної концентрації шкідливих речовин, яка перевищить ГДК.

ТУВ – тимчасово узгоджені викиди – це викиди шкідливих речовин на рівні викидів підприємств з найкращою досягнутою технологією виробництва, аналогічних по потужності та технологічним процесам.

2.2. Оцінка стану повітряного середовища

Як уже було сказано вище, нормування якості повітря регламентується встановленням науково-технічних нормативів гранично допустимих викидів забруднюючих речовин: $ГДК_{\text{ап}}$, $ГДК_{\text{мр}}$, $ГДК_{\text{сд}}$, $ГДК_{\text{рз}}$, $ГДК_{\text{нп}}$, $ГДК_{\text{тп}}$, ОБРВ. Забруднюючі речовини відрізняються за ступенем шкідливості: по сукупності токсикологічних характеристик їх відносять до різних класів небезпеки. Тому існує показник – індекс забруднення атмосферного повітря, який об'єднує сукупність характеристик.

Індекс забруднення атмосферного повітря розраховується за сумою нормованих концентрацій, приведених до концентрації речовин 3-го класу небезпеки (всього розрізняють 4 класи небезпеки, найбільш небезпечні відносяться до 1-го класу).

Ступінь забруднення атмосферного повітря встановлюється з врахуванням кратності перевищення речовин ГДК, їх класу небезпеки, допустимої повторюваності концентрації заданого рівня, кількості речовини, яка одночасно присутня в повітрі, коефіцієнтів їх комбінованої дії.

Для оцінки стану повітряного середовища в цілому запропонований ряд комплексних показників забруднення атмосфери (сумісно з декількома забруднюючими речовинами). Найпоширенішим є комплексний індекс забруднення атмосфери ($I_{\text{за}}$). Його розраховують як суму нормованих за $ГДК_{\text{сд}}$ і приведених до концентрації діоксиду сірки середнього вмісту різних шкідливих речовин:

$$I_{\text{за}} = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{C}_i}{ГДК_{\text{сд}}^i} \right)^{a_i}$$

де: I_i – індивідуальний індекс забруднення для i -ої речовини;

$\bar{C}_i$ – середня концентрація в повітрі i -ої речовини;

$ГДК_{\text{сд}}^i$ – гранично допустима концентрація середньодобова для i -ої речовини;

a_i – безрозмірна константа приведення ступеня шкідливості i -ої речовини до

шкідливості діоксиду сірки, яка залежить від того, до якого класу небезпечності належить забруднююча речовина (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Значення константи a_i залежно від класу небезпечності забруднюючої речовини

Класи небезпечності	1	2	3	4
Константа a_i	1,7	1,3	1,0	0,9

Примітка: усі нормовані речовини (ГОСТ 12.1.007) поділені на класи небезпечності див. табл. 2.3.

В теперішній час, у зв'язку з розвитком промисловості, зростанням процесів урбанізації створюються умови надходження в навколишнє середовище і організм людини одночасно декількох шкідливих хімічних речовин. У зв'язку з цим з'явилося таке поняття, як комбінована дія хімічних речовин.

Таблиця 2.3

Класи небезпечності нормованих речовин

Клас небезпечності	Ступінь небезпечності	Величина ГДК, мг/м ³
I	Надзвичайно небезпечні речовини	$\leq 0,1$
II	Високонебезпечні речовини	0,1 – 1,0
III	Помірнебезпечні речовини	1,0-10,0
IV	Малонебезпечні речовини	$> 10,0$

Існують три основні типи комбінованої дії хімічних речовин:

- синергізм, коли одна речовина посилює дію іншої;
- антагонізм, коли одна речовина послаблює дію іншої;
- сумація або адитивна дія, коли дія речовин в комбінації сумується.

Накопичені токсикологічними дослідженнями дані свідчать про те, що в більшості випадків промислові викиди і скиди шкідливих речовин в комбінації діють за типом сумації, тобто дія їх додається. Це важливо враховувати при оцінці якості повітряного середовища. Для співставлення даних про забрудненість декількома речовинами атмосферного повітря різних міст або районів міста комплексні індекси забруднення атмосфери мають бути розраховані для однакової кількості (n) домішок.

У випадку присутності в атмосферному повітрі декількох забруднюючих речовин, які мають здатність до сумарної дії їх сумарно допустима концентрація повинна відповідати умові:

$$\frac{C_1}{ГДК_1} + \frac{C_2}{ГДК_2} + \dots + \frac{C_n}{ГДК_n} \leq 1$$

де: $C_1, C_2, \dots, C_n$ – фактичні концентрації речовин в атмосферному повітрі (при одночасному відборі проб в одній місцевості, мг м³);

$ГДК_1, ГДК_2, ГДК_n$ – гранично допустимі концентрації цих речовин в атмосферному повітрі, мг/м³.

В кожному конкретному випадку при забрудненні атмосфери декількома речовинами одночасно необхідно робити висновок про характер їх комплексної дії на організм людини.

Потенціювання – взаємне підсилення впливу двох або більшої кількості агентів навколишнього середовища, при якому сумарний ефект їхнього взаємного впливу перевищує суму ефектів, що виникають при ізольованій дії кожного з цих агентів зокрема.

Ефект сумації мають:

- ацетон, фурфурол, формальдегід, фенол;
- всі хлорорганічні пестициди;
- озон, діоксид нітрогену та формальдегід;
- діоксид сульфуру та аерозолі сульфатної кислоти;
- діоксид сульфуру та сірководень тощо.

Ефект потенціювання притаманний таким речовинам:

- флюористий гідроген та фториди з коефіцієнтом 0,8;
- бутилакрилат та метилметакрилат з коефіцієнтом 0,8.

ГДК деяких найбільш поширених шкідливих речовин в атмосферному повітрі наведено в таблиці 2.4.

Як видно навіть з цього невеликого переліку, нижня межа токсичності шкідливих речовин, тобто їх ГДК, дуже відрізняються.

Таблиця 2.4

ГДК деяких шкідливих речовин у повітрі населених пунктів мг/м³

Речовина	ГДК _{с.д.}	ГДК _{м.р.}	К
Тверді речовини (пил)	0,15	0,2	3
Двоокис сірки	0,05	0,5	1,0
Двоокис азоту	0,04	0,085	0,8
Окис азоту	0,06	0,4	1,2
Окис вуглецю	3,0	5,0	60
Аміак	0,04	0,2	0,8
Хлористий водень	0,2	0,2	4,0
Ціанистий водень	0,01	-	0,2
Окис кадмію	0,001		0,02
Свинець	0,0003	0,03	0,005
Сірководень	0,005	0,03	0,1
Бенз(а)пірен	0,000001		0,00002
Фенол	0,003	0,01	0,06
Формальдегід	0,003	0,035	0,06
Фтористий водень	0,005	0,2	0,1

Примітка: 1. $K = ГДК_{с.д.}^{реч} / ГДК$; 2. На територіях, які підлягають посиленій охороні, встановлюють більш жорсткі вимоги – ГДК повинні бути зменшені на 20 %.

При складанні щорічного списку міст з найбільшим рівнем забруднення атмосфери для розрахунку комплексного індексу $I_{за}$ використовують значення індивідуальних індексів I_i тих п'яти речовин, у яких ці значення найбільші.

Останнім часом зростає кількість відомостей про ефекти дії забруднюючих речовин на біоту, в тому числі атмосферних домішок на рослинність. Так, встановлено, що хвойні породи дерев та лишайники більш чутливо за інші види рослинності реагують на присутність в атмосферному повітрі кислих газів і в першу чергу сірчаного ангідриду. Дослідники пропонують встановити гранично допустимі концентрації для деяких видів забруднюючих речовин, аби використовувати ці нормативи для оцінки збитків і обмеження шкідливого впливу на природні об'єкти, що охороняються (наприклад, заповідні території) див. табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Гранично допустимі концентрації забруднюючих речовин в атмосферному повітрі

для рослин

Назва забруднюючої речовини	Гранично допустимі концентрації, мг/м ³			
	Для рослин в цілому максимально разові	Для деревних порід		Для людини
		Максимально разові	Середньодобові	
Диоксид сірки	0,02	0,03	0,015	0,5
Аміак	0,05	0,1	0,04	0,2
Бензол	0,1	0,1	0,05	1,5
Хлор	0,25	0,025	0,015	0,1
Сірководень	0,02	0,008	0,008	0,008
Формальдегід	0,02	0,02	0,003	0,035
Пил, цемент	-	0,02	0,05	0,5
Метанол	0,2	0,2	0,1	1,0

Однак, широке використання чутливості рослин знайшло місце лише в біологічному моніторингу. Екологічне нормування стану атмосферного повітря на практиці майже не реалізується (можливо через те, що атмосфера є по суті системою Лоренцо, тобто системою, чутливою до вихідних, миттєвих параметрів).

Отже, нормативи якості навколишнього природного середовища (ГДК) є тим наріжним каменем, на основі якого розробляються заходи, приймаються рішення, підраховуються затрати на охорону природи і оплату за користування природою.

Щоб знайти компроміс між екологією та економікою, дуже важливо встановлювати науково обґрунтовані, ретельно перевірені і досяжні нормативи.

Також, для оцінки ступеня забрудненості атмосфери проводять визначення категорії небезпечності підприємств, залежно від маси, виду та складу забруднюючих речовин, що викидаються в атмосферу. Категорію небезпечності підприємств (КНП) розраховують згідно з виразом:

$$КНП = \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i}{ГДК_{co}} \right)^{a_i}$$

де M_i – маса викиду i -ої речовини, т/рік;

$ГДК_{co}$ – середньодобова граничнодопустима концентрація i -ої речовини, мг/м³;

n – кількість шкідливих речовин, які викидаються підприємством і забруднюють атмосферу;

a – безрозмірна константа, яка дозволяє порівняти ступінь шкідливості i -ої речовини зі шкідливістю діоксиду сульфуру.

Для класу небезпечності хімічних речовин 1 – $a=1,7$;

Для класу небезпечності хімічних речовин 2 – $a=1,3$;

Для класу небезпечності хімічних речовин 3 – $a=1,0$;

Для класу небезпечності хімічних речовин 4 – $a=0,9$.

Для розрахунку КНП за відсутності середньодобових значень ГДК використовують значення $ГДК_{mr}$ або зменшують в десять разів значення ГДК забруднюючих речовин для робочої зони.

За величиною КНП підприємства поділяють на 4 категорії небезпечності. Граничні умови для виділення підприємства за категоріями небезпечності наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Категорії небезпечності підприємств та граничні значення КНП

Категорії небезпечності	Значення КНП	Санітарно-захисна зона (СЗЗ), м

I	$\geq 10^8$	1000
II	$10^8 < \text{КНП} \leq 10^4$	500
III	$10^4 < \text{КНП} \leq 10^3$	300
IV	$< 10^3$	100

Залежно від категорії небезпечності підприємства здійснюється облік викидів забруднюючих речовин в атмосферу і запроваджується періодичність контролю за викидами підприємств, а також визначається розмір санітарно-захисних зон від джерел забруднень до житлових районів.

2.3. Науково-технічні нормативи на гранично допустимі викиди

Відповідно до Закону “Про охорону атмосферного повітря”, з метою обмеження техногенної дії на атмосферу, в якості охоронного заходу, поряд з ГДК, передбачають регулювання і кількісне обмеження викидів в атмосферу. Реалізація цього положення Закону здійснюється нормуванням гранично допустимим викидом забруднюючих речовин стаціонарними і пересувними джерелами забруднення.

Гранично допустимий викид – це маса шкідливої речовини, яка не повинна перевищуватися під час викиду в атмосферу за одиницю часу.

ГДВ встановлюється для кожного джерела забруднення атмосфери (і для кожного інгредієнту, який надходить до атмосфери з цього джерела), таким чином, що викиди шкідливих речовин від даного джерела та від сукупності джерел усього населеного пункту з урахуванням перспектив розвитку інфраструктури промислових підприємств і розсіювання шкідливих речовин в атмосфері не створюють приземну концентрацію, яка перевищувала б їх ГДК_{мр} (гранично допустима концентрація максимального разова).

Основні значення ГДВ_{мр} (максимальні разові), встановлюються за умови повного навантаження як технологічного, так і газоочисного обладнання та їх нормальної роботи, і не повинні перевищуватись в будь-який довільний 20-хвилинний період часу.

Поряд з максимальними разовими (контрольними) значеннями ГДВ (г·с⁻¹) встановлюють похідні від них та річні значення ГДВ_р (т·рік), для окремих джерел і для підприємства в цілому з урахуванням нерівномірності викидів у часі, в тому числі з огляду на планові ремонти технологічного та газоочисного обладнання.

ГДВ для кожного стаціонарного джерела (ГДВ_д) встановлюється відповідно з ГОСТ 17.2.3.02 за умови, що викиди шкідливих речовин від такого джерела сумісно з фоновим забрудненням не створять в приземному шарі атмосфери концентрацію, яка перевищує ГДК, тобто необхідним є виконання умови:

$$C_m + C_\phi \leq ГДК$$

де C_m , C_ϕ – концентрація в приземному шарі атмосфери забруднювачів від цього джерела (за умов найбільш несприятливих для розсіювання) та фону.

Фонове забруднення – це забруднення, яке створює у певній місцевості всіма існуючими джерелами викидів, за винятком того, що розглядається. Якщо значення ГДВ з об’єктивних причин не можуть бути досягнуті, то для таких підприємств встановлюють значення тимчасово узгоджених викидів шкідливих речовин (ТУВ) і вводиться поетапне зниження показників викидів шкідливих речовин до значень, які

забезпечували б дотримання ГДВ.

Громадський екологічний моніторинг має право вирішувати задачі оцінки відповідності діяльності підприємства встановленим значенням ГДВ або ТУВ шляхом визначення концентрацій забруднюючих речовин у приземному шарі повітря (наприклад, на границі санітарно-захисної зони).

ГДВ для нагрітих викидів з одиночного джерела з круглим отвором. ГДВ для нагрітих викидів з одиночного джерела з круглим отвором або групи таких, які близько розташовані один біля одного одиночних джерел у випадках, коли фонові концентрації сумішей C_{ϕ} – встановлена як незалежна від швидкості та напрямку вітру і постійна на території, що розглядається, визначається за формулою:

$$ГДВ = \frac{(ГДК - C_{\phi}) \cdot H^2 \cdot \sqrt{V_1 \cdot \Delta T}}{A \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}$$

де A – коефіцієнт, що залежить від температурної стратифікації атмосфери та визначає умови горизонтального розсіювання атмосферних домішок,

F – безрозмірний коефіцієнт що враховує швидкість осідання шкідливих речовин в атмосфері;

m, n – безрозмірні коефіцієнти, що враховують умови виходу газоповітряної суміші з отвору джерела викиду;

η – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив рельєфу місцевості на розсіювання домішок;

H – висота джерела викиду над рівнем землі, м;

V_1 – об'єм газоповітряної суміші, м³/с;

ΔT – різниця між температурою газоповітряної суміші, що викидається, та температурою навколишнього повітря;

Об'єм виходу газоповітряної суміші вираховують за формулою:

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \omega_0$$

де D – діаметр отвору джерела викиду, м;

ω_0 – середня швидкість виходу газоповітряної суміші з отвору джерела викиду, м/с;

У випадках, коли значення фонові концентрації деталізовані за швидкістю та напрямком вітру або за територією, врахування C_{ϕ} проводиться відповідно до “Тимчасових вказівок з визначення фонових концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі для нормування викидів та встановлення ГДВ”, а також встановлюється за даними спостережень. В інших випадках фон розраховується шляхом використання даних інвентаризації викидів всіх існуючих джерел шкідливої речовини, що розглядається, та інших речовин, що мають з нею ефект сумачії за шкідливою дією.

Розрахунок ГДВ проводиться таким чином:

- коефіцієнт A вибирається для несприятливих метеорологічних умов, за яких концентрації шкідливих речовин в атмосфері від джерела викиду сягають максимальних значень;

- значення V_1 та T_e визначаються шляхом технологічних розрахунків або приймаються згідно з діючими для розглядуваного виробництва нормативами:

- при очищенні викидів від шкідливої речовини, що розглядається, ГДВ повинні прийматися за її вмістом в газоповітряній суміші після проходження очисних пристроїв;

○ при розрахунку ГДВ повинні прийматися менші значення V_1 та T_z , що реально сумісно спостерігалися протягом року при ustalених (звичайних) умовах функціонування підприємства;

• значення T (°C) слід визначати, приймаючи температуру повітря T_n такою, як його середня температура о 13 годині найбільш спекотного місяця:

○ при визначенні значення T_z повинні враховуватися підсмоктування повітря та охолодження викидів у випадку застосування мокрого пило- та газоочищення;

○ для котелень, що працюють за опалювальним графіком, допускається при розрахунках приймати значення T_n рівними середній температурі повітря у найхолодніший період;

• безрозмірний коефіцієнт набуває таких значень:

○ для газоподібних шкідливих речовин та дрібнодисперсних аерозолів, для яких швидкість впорядкованого осідання найбільш крупних фракцій не перевищує $3...5 \text{ см/с} - 1,0$;

○ для крупно дисперсного пилу та золи при середньому експлуатаційному коефіцієнті очищення не менше $90\% - 2,0$; $75...90\% - 2,5$, не менше 75% або за відсутності очищення – $3,0$.

Незалежно від ефективності пиловловлювальних пристроїв значення коефіцієнта дорівнює $3,0$ і при розрахунках розсіювання пилу в атмосфері для виробництв, у яких викиди пилу супроводжуються виділенням водяної пари в кількості, достатній для інтенсивної її конденсації протягом всього року одразу ж після виходу в атмосферу, а також коагуляції вологих пилових часток;

• значення безрозмірного коефіцієнта m визначається в залежності від параметра f , $\text{м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ за формулою:

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{f} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{f}}$$

де f розраховується за залежністю:

$$f = 10^3 \cdot \frac{\omega_0^2}{H^2 \cdot \Delta T}$$

• значення безрозмірного коефіцієнта n визначається такими рівняннями в залежності від параметра V_m :

○ якщо $V_m \leq 0,3$ $n = 3$;

○ якщо $0,3 \leq V_m \leq 2$ $n = 3 - \sqrt{\frac{(V_m - 0,3)}{(4,36 - V_m)}}$;

○ якщо $V_m > 2$ $n = 1$

При цьому V_m визначається за виразом:

$$V_m = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta T}{H}}$$

• безрозмірний коефіцієнт η дорівнює одиниці, якщо в радіусі п'ятдесяти висот труб H від джерела перепад відміток місцевості не перевищує 50 м на 1 км . В інших випадках поправка на рельєф встановлюється на підставі картографічного матеріалу, що висвітлює рельєф місцевості в радіусі п'ятдесяти висот труб від джерела, але не менше 2 км ; якщо в районі розташування джерела викидів (підприємства) можна виявити окремі ізольовані перепони, витягнені в одному напрямку (пасма, гребені, балки, виступи), то коефіцієнт η розраховується таким

чином:

$$\eta = 1 + \varphi_1 \cdot \left(\frac{|x_0|}{a_0} \right) \cdot (\eta_m - 1)$$

де η_m , визначається за табл. 3.1 в залежності від форм рельєфу і безрозмірних величин n_1, n_2 .

$$n_1 = H/\eta_0$$

$$n_2 = a_0/x_0$$

де n_1 визначається з точністю до десятих, а n_2 – з точністю до цілих;

H – висота джерела;

η_0 – висота (глибина) перепони,

a_0 – напівширина пасма, гребеня, балки або протяжність бічного схилу виступу,

x_0 – відстань від середини перепони (для пасма або балки) та від верхньої кромки схилу (для виступу) до джерела.

Таблиця 3.1

Значення η_m залежно від n_1 і n_2

n_1	n_2								
	Балка (впадина)			Виступ			Гребінь (пагорб)		
	6-9	10-15	16-20	6-9	10-15	16-20	6-9	10-15	16-20
0,5	2,0	1,6	1,3	1,8	1,5	1,2	1,5	1,4	1,2
0,6-1,0	1,6	1,5	1,2	1,5	1,3	1,2	1,4	1,3	1,2
1,0	1,5	1,4	1,1	1,4	1,2	1,1	1,3	1,2	1,0

ГДВ для холодної газоповітряної суміші. Величина ГДВ для холодної газоповітряної суміші за умов, однакових з розглянутими вище, визначається за формулою:

$$ГДВ = \frac{(ГДК - C_\phi) \cdot H^{4/3}}{A \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta} \cdot 8V_1$$

Залежність значень коефіцієнта A від розташування джерела на території країни така ж, як і у випадку нагрітих викидів.

Безрозмірний коефіцієнт n визначається в залежності від значення параметра V_m , що розраховується за рівнянням:

$$V_m = 1,3 \cdot \frac{\omega_0 \cdot D}{H}$$

Якщо різниця температур ΔT (°C) близька до нуля або при розрахунках параметр f перевищує $100 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, то для таких викидів ГДВ розраховуються так само, як і для холодних викидів, оскільки початкове перегрівання ΔT не справляє суттєвого впливу на початкове піднімання факела та розсіювання викидів в атмосфері.

ГДВ для викидів з джерела з прямокутним устям. Величина ГДВ для викидів з джерела з прямокутним устям визначається за формулами для нагрітих газоповітряних сумішей, але при $D = D_e$ та $V_1 = V_{le}$. При цьому ефективний діаметр устя джерела D_e визначається за формулою:

$$D_e = \frac{2Lb}{L+b}$$

де L – довжина устя, м;

b – ширина устя, м.

Ефективний об'єм газоповітряної суміші V_{le} , що викидається в атмосферу, в цьому випадку визначається за формулою:

$$V_{le} = \frac{\pi \cdot L^2 \cdot b^2 \cdot \omega_0}{(L + b)^2}$$

Для джерела з квадратним устям ($L = b$) ефективний діаметр D_e , дорівнює довжині сторони квадрата.

ГДВ для викидів з одиночного аераційного ліхтаря. Значення ГДВ для випадку викидів з одиночного аераційного ліхтаря визначається за формулою:

$$ГДВ = \frac{ГДВ_0}{S_3}$$

де $ГДВ_0$ – значення ГДВ, розраховане за рівнянням для нагрітих або холодних газоповітряних сумішей при $D = 0$, та $V_1 = V_{le}$. Значення D_e для випадку аераційного ліхтаря визначається за залежністю:

$$D_1 = \frac{2LV_1}{L_2\omega_0 + V_1}$$

де L – довжина аераційного ліхтаря, м;

ω_0 – середня швидкість виходу газоповітряної суміші з аераційного ліхтаря, м/с.

- Значення V_{le} визначається за формулою:

$$V_{le} = \frac{\pi \cdot D_e^2}{4} \cdot \omega_0$$

- Безрозмірний коефіцієнт S_3 , визначається за рівнянням:

$$S_3 = \frac{1 + 0,45 \cdot L/X_m}{1 + 0,45 \cdot L/X_m + 0,1 \cdot (L/X_m)^2}$$

Фізичний сенс величини X_m – це відстань від одиночного точкового джерела з $D = D_e$ та $V_1 = V_{le}$, на якій при несприятливих метеорологічних умовах досягається максимальна концентрація.

2.4. Інструменти економічного механізму охорони атмосферного повітря

Нормування зборів і плати за викиди забруднюючих речовин регламентується Законами України “Про охорону навколишнього природного середовища”, “Про підприємництво”, “Про затвердження Порядку встановлення нормативів збору за забруднення навколишнього природного середовища і стягнення цього збору” та ін. Екологічне законодавство передбачає економічні заходи забезпечення охорони атмосферного повітря на основі економічних важелів; встановлення лімітів використання атмосферних ресурсів, викидів забруднюючих речовин в атмосферу; встановлення нормативів збору і розмірів зборів за використання атмосферних ресурсів.

Економічний механізм охорони атмосферного повітря містить цілий ряд інструментів впливу на матеріальні інтереси підприємств та окремих працівників – це лімітування природокористування, платність природокористування, фінансування на природоохоронні заходи, матеріальне стимулювання, оподаткування, кредитування, штрафування тощо.

Лімітування природокористування – дієвий елемент механізму охорони атмосферного повітря. Існують підприємства, які, з екологічної точки зору, краще

було б закрити або перепрофілювати, тобто перевести на випуск іншої продукції, що завдавало би менше шкоди атмосферному повітрю. Проте, з економічної точки зору, а часом і з соціальної, це не завжди реально, оскільки підприємство може бути постачальником потрібних суспільству товарів та робочих місць. У цьому випадку його діяльність в галузі природокористування деякий час регулюється не нормативами ГДВ, а індивідуальними лімітами, тобто ТПВ (тимчасово погоджені викиди) – кількість забруднюючих речовин, що викидаються в атмосферне повітря з окремого джерела забруднення за одиницю часу, яка встановлюється на відповідний строк – до досягнення гранично допустимих викидів.

Платність природокористування було запроваджено на початку 90-х років ХХ ст. Воно передбачає плату практично за всі природні ресурси, за забруднення навколишнього природного середовища, розташування в ньому відходів виробництва та за інші види впливів. При цьому плата за понадлімітне використання та забруднення в декілька разів перевищує плату за використання та забруднення в межах встановлених нормативів.

Матеріальне стимулювання, важливий економічний метод – це забезпечення зацікавленості, вигідності природоохоронної діяльності для підприємства та його працівників. При цьому передбачається застосування не лише заохочувальних заходів, але й покарань. До заохочувальних заходів належать: встановлення податкових пільг; звільнення від оподаткування екологічних фондів та природоохоронного майна; застосування заохочувальних цін та надвишок на екологічно чисту продукцію; застосування пільгового кредитування підприємств, які ефективно здійснюють ОНПС.

Підприємства будуть активно працювати в галузі природоохоронної діяльності, коли буде розроблено та широко впроваджено такий механізм стимулювання, при якому дотримується наступна нерівність:

$$\begin{aligned} Z_{\text{под}} &< (P_{\text{ут}} + \Pi_n + K_n + \mathcal{U}_n) \\ Z_{\text{под}} &< (\Pi_{\text{нв}} + \Pi_{\text{нз}} + \Pi_{\text{ср}} + \mathcal{I} + \mathcal{D}_n) \end{aligned}$$

де $Z_{\text{под}}$ – видатки підприємства на природоохоронну діяльність; $P_{\text{ут}}$ – прибуток від утилізації відходів; Π_n – пільги оподаткування; K_n – кредитні пільги; $\mathcal{U}_n$ – надвишка до ціни; $\Pi_{\text{нв}}$ – плата за понаднормативне використання ресурсів природи; $\Pi_{\text{нз}}$ – плата за понаднормативне забруднення навколишнього середовища; $\Pi_{\text{ср}}$ – плата за розташування відходів в навколишньому середовищі; $\mathcal{I}$ – штрафи; $\mathcal{D}_n$ – додаткове оподаткування.

Елементи першої формули повинні збільшувати прибуток, який залишається у розпорядженні підприємства за умови реалізації ефективної природоохоронної діяльності, а елементи другої формули – знижувати його, коли підприємство намагається заощаджувати на природоохоронних видатках.

Плата за спеціальне використання атмосферних ресурсів встановлюється на основі нормативів зборів і лімітів їх використання. Нормативи збору за використання атмосферних ресурсів визначаються з урахуванням їх якості, можливості відтворення, доступності, комплексності, продуктивності та інших факторів. Нормативи збору за використання атмосферних ресурсів, а також порядок її стягнення встановлюються Кабінетом Міністрів України.

Плата за забруднення атмосферного повітря встановлюється на основі лімітів викидів забруднюючих речовин в атмосферного повітря стаціонарними і

пересувними джерелами, які встановлюються Міністерством екології та охорони навколишнього природного середовища України у випадках, коли це призводить до забруднення природних ресурсів республіканського значення, територій інших областей; в інших випадках – обласними, міськими Радами за поданням органів Міністерства екології та охорони навколишнього природного середовища України. Порядок встановлення нормативів збору і стягнення зборів за забруднення навколишнього природного середовища визначається Кабінетом Міністрів України (стаття 44 згідно із Законом N 186/98-ВР від 05.03.98).

2.5. Порядок встановлення нормативів збору за забруднення і погіршення якості атмосферного повітря

Нормативи збору за забруднення атмосферного повітря встановлюються як фіксовані суми в гривнях за одиницю основних забруднюючих речовин. Органи Міністерством екології та охорони навколишнього природного середовища України разом з органами місцевого самоврядування або з місцевими державними адміністраціями визначають перелік платників збору та подають його до органів державної податкової служби. Нормативи збору встановлюються відповідно до виду забруднюючих речовин та класу їх небезпеки.

Платниками збору є суб'єкти підприємницької діяльності, незалежно від форм власності, бюджетні, громадські та інші підприємства, установи і організації; громадяни, які здійснюють на території України викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря.

Об'єктами обчислення збору є:

- для стаціонарних джерел забруднення – обсяги забруднюючих речовин, які викидаються в атмосферне повітря;
- для пересувних джерел забруднення – обсяги фактично використаних видів пального, в результаті спалення яких утворюються забруднюючі речовини.

Розміри збору за забруднення справляються за викиди в атмосферне повітря забруднюючих речовин.

Нормативи збору за викиди основних забруднюючих речовин стаціонарними джерелами встановлюються на основі їх гранично допустимої концентрації, відносної оцінки економічного збитку від шкідливої дії викидів і затверджуються Міністерством екології та охорони навколишнього природного середовища України за погодженням із Міністерством економіки України та Міністерством фінансів України (додаток).

Нормативи збору за викиди забруднюючих речовин, для яких не має затвердженої середньодобової гранично допустимої концентрації, слід застосовувати залежно від установленого класу небезпечності даної забруднюючої речовини, згідно з табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Нормативи збору, який справляється за викиди забруднюючих речовин стаціонарними джерелами забруднення залежно від класу небезпечності

Клас небезпечності	Норматив збору, грн. /т
I	572

II	131
III	19,5
IV	4,5

Для забруднюючих речовин, на які не встановлено класів небезпечності, нормативи збору застосовуються залежно від установлених орієнтовно безпечних рівнів впливу згідно з табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Нормативи збору, який справляється за викиди забруднюючих речовин стаціонарними джерелами забруднення, залежно від установлених орієнтовно безпечних рівнів впливу

Орієнтовно-небезпечні рівні впливу сполук, мг/м	Норматив збору, грн. /т
< 0,0001	24078
0,0001 - 0,001	2063
0,001 - 0,01	285
0,01 - 0,1	80
> 0,10	3

Для забруднюючих речовин, на які не встановлено класів небезпечності та орієнтовно безпечних рівнів впливу, норматив збору встановлюється за викид забруднюючої речовини I класу небезпечності.

Ліміти викидів стаціонарними джерелами забруднення визначаються органами Міністерством екології та охорони навколишнього природного середовища України для платників збору на підставі затверджених проектів нормативів гранично допустимих викидів терміном на п'ять років на підставі затверджених проектів нормативів гранично допустимих викидів. Для пересувних джерел забруднення ліміти викидів забруднюючих речовин не встановлюються.

Порядок обчислення збору регламентується Постановою Кабінету Міністрів України від 1 березня 1999 р. № 303 “Про затвердження порядку встановлення нормативів збору за забруднення навколишнього природного середовища і стягнення цього збору.” Суми збору, який справляється за викиди стаціонарними джерелами забруднення, скиди і розміщення відходів, обчислюються платниками збору самостійно на підставі затверджених лімітів виходячи з фактичних обсягів викидів, скидів і розміщення відходів, нормативів збору та коригуючих коефіцієнтів.

Суми збору за викиди стаціонарними джерелами забруднення (P_{ac}) визначається за формулою:

$$P_{BC} = \sum_{i=1}^n (M_{li} \cdot H_{\delta i} \cdot K_{nac} \cdot K_{\phi}) + (M_{ni} \cdot H_{\delta i} \cdot K_{\phi} \cdot K_{nac} \cdot K_n)$$

де M_{li} – обсяг викиду i -ої забруднюючої речовини в тоннах у межах ліміту;

M_{ni} – обсяг понадлімітного викиду (різниця між: обсягом фактичного викиду і ліміту) i -ої забруднюючої речовини в т;

$H_{\delta i}$ – норматив збору за тонну i -ої забруднюючої речовини, у гривнях (грн/т);

K_{nac} – коригувальний коефіцієнт, який враховує чисельність жителів населеного пункту;

K_{ϕ} – коригувальний коефіцієнт, який враховує народногосподарське значення населеного пункту;

K_n – коефіцієнт кратності збору за понадлімітний викид в атмосферу забруднюючих речовин – 5.

Значення коефіцієнтів, що враховують територіальні соціально-екологічні особливості, $K_{нас}$ і K_{ϕ} наведено в табл. 3.4 і 3.5 відповідно.

Таблиця 3.4

Коефіцієнт, який встановлюється залежно від чисельності жителів населеного пункту

Чисельність населення, тис. чоловік	Коефіцієнт $K_{нас}$
До 100	1,00
100,1-250	1,20
250,1-500	1,35
500,1-1000	1,55
понад 1000	1,80

Таблиця 3.5

Коефіцієнт, який встановлюється залежно від народногосподарського населеного пункту

Тип населеного пункту	Коефіцієнт K_{ϕ}
Організаційно-господарські та культурно-побутові центри місцевого значення з перевагою аграрно-промислових функцій (районні центри, міста районного значення, селища та села)	1,0
Багатофункціональні центри, центри з перевагою промислових і транспортних функцій (республіканський* та обласні центри, міста державного республіканського*, обласного значення)**	1,25
Населені пункти, віднесені до курортних з перевагою рекреаційних функцій	1,65

* Автономної Республіки Крим.

** Якщо населений пункт одночасно має промислове значення та віднесений до курортних, застосовується коефіцієнт 1,65.

Нормативи збору, який справляється за викиди в атмосферу забруднюючих речовин пересувними джерелами забруднення. Суми збору, який справляється за викиди пересувними джерелами забруднення згідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 303 від 1 березня 1999р. обчислюються платниками самостійно щокварталу нарастаючим підсумком з початку року, виходячи з кількості фактично використаного пального та його виду. Нормативи збору встановлюються в залежності від виду пального та транспорту (автомобільного, залізничного, морського та річкового).

Нормативи збору плати за викиди в атмосферу забруднюючих речовин автомобільним транспортом вказані в табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Нормативи збору плати за викиди автомобільним транспортом

Вид пального	Норматив збору, грн./т
Дизельне паливо	4,5
Бензин:	
етилований	6
не етилований	4,5
Зріджений нафтовий газ	6
Стиснений природний газ	3

Збір, який справляється за викиди пересувними джерелами забруднення, відноситься на валові витрати виробництва та обігу. Суми збору обчислюються платниками збору самостійно на підставі нормативів збору за ці викиди виходячи з кількості фактично використаного пального та його виду і коригуючих коефіцієнтів, наведених у таблицях 3.4 і 3.5.

Нормативи плати за викиди в атмосферу забруднюючих речовин морськими та річковими суднами вказані в табл.3.7

Таблиця 3.7

Нормативи плати за викиди морськими та річковими суднами

Вид пального	Норматив збору, грн./т
Бензин	9
Дизельне паливо	6
Мазут	4,5

Нормативи плати за викиди в атмосферу забруднюючих речовин залізничним транспортом вказані в табл.3.8.

Таблиця 3.8

Нормативи плати за викиди залізничним транспортом

Вид пального	Норматив збору, грн./т
Дизельне паливо	4,5

Суми збору (Пвп), який справляється за викиди пересувними джерелами забруднення визначається за формулою:

$$П_{ВП} = \sum_{i=1}^n M_i \cdot H_{\bar{o}i} \cdot K_{нас} \cdot K_{\phi}$$

де M_i – кількість використаного пального i -го виду, у тонах;

$H_{\bar{o}i}$ – норматив збору за тонну i -го виду пального, у гривнях.

Контрольні запитання

Як сплачують за лімітні та понадлімітні викиди в атмосферне повітря?

Як розраховують розмір платежу за викиди в атмосферу?

Розділ 3

Організація спостережень за забрудненням атмосферного повітря

3.1. Загальні вимоги до організації спостережень за забрудненням атмосферного повітря

Зростання антропогенного впливу на навколишнє середовище вимагає оволодіння різноплановою і детальною інформацією про нього, яка дає змогу не тільки оцінити реальну ситуацію, а й спрогнозувати стан середовища у перспективі, налагодити раціональну систему природоохоронної діяльності, контролю за станом екосистем.

Організація спостережень передбачає контроль за поширенням шкідливих домішок як в самій атмосфері, так і між елементами системи “атмосфера–гідросфера–літосфера–біосфера”. Для цієї діяльності необхідні:

- відомості про наявні та перспективні джерела забруднення атмосфери (з урахуванням розвитку економічних районів);
- характеристика забруднюючих речовин (токсичність, здатність вступати в хімічні реакції з іншими речовинами, здатність до самоочищення);
- гідрометеорологічні дані;
- результати попередніх спостережень за забрудненням атмосфери (експедиційні дослідження);
- дані про рівні забруднення навколишнього природного середовища в сусідніх країнах;
- відомості про транскордонне перенесення шкідливих домішок.

Комплекс завдань, пов'язаних зі збором цієї інформації, виконує спеціальна служба спостережень, яку формують система спостережень і система контролю.

Система спостережень забезпечує спостереження за якістю атмосферного повітря в містах, населених пунктах і територіях, розміщених поза зоною впливу конкретних джерел забруднення. Спостереження здійснюють служби Держкомітету гідрометеорології, які надають дані про метеорологічні умови і концентрацію шкідливих речовин. Міністерство охорони здоров'я проводить вибіркові спостереження за рівнем забруднення в місцях проживання населення. Науковий комітет Національної академії наук України організовує авіаційно-космічні спостереження за станом озонового шару і глобальним забрудненням атмосфери. Практикуються екологічні спостереження за окремими підприємствами.

Система контролю здійснює спостереження і контроль за джерелами забруднення, викидами шкідливих речовин в атмосферу. З цією метою Міністерство екології та природних ресурсів організовує спостереження за джерелами промислових викидів в атмосферу та дотриманням норм гранично допустимих викидів, контролює реалізацію заходів з охорони атмосферного повітря, дотримання відповідних вимог при розміщенні, проектуванні, будівництві та введенні в експлуатацію нових підприємств.

При організації спостережень за станом повітря використовують попередні дослідження, які передбачають обстеження території (метеорологічні умови, вміст

забруднювачів) за допомогою пересувних лабораторій, що здійснюють відбір та аналіз проб з метою вивчення розміщення діючих джерел забруднення та перспектив розвитку промисловості.

Після з'ясування наявного та перспективного рівнів забруднення атмосферного повітря оцінюють зміни концентрацій домішок у просторі й часі, розробляють схему розміщення постійних (стаціонарних) постів спостереження на території міста, програми їх роботи. Пост спостережень може надавати інформацію про загальний стан повітряного басейну (якщо він знаходиться поза зоною впливу окремих джерел викидів) і контролювати джерела викидів (якщо він перебуває в зоні впливу джерел викидів). При їх розміщенні пріоритетними є житлові райони з найбільшою щільністю населення, де можливе перевищення встановлених порогових значень гігієнічних показників (ГДК). Робота постів спостережень повинна відповідати таким умовам:

- обов'язковість відображення загального стану повітряного басейну і контроль за джерелами викиду;
- необхідність здійснення спостережень за всіма домішками, концентрації яких перевищують ГДК;
- обов'язковість визначення пилу, діоксиду сірки, оксиду вуглецю та оксидів азоту.

Контроль за радіоактивним забрудненням атмосферного повітря здійснюється на фоновому рівні, а також у зонах впливу атомних електростанцій та інших джерел можливих викидів радіоактивних речовин. Під час контролю за радіоактивним забрудненням на фоновому рівні використовують фонові станції або спеціальні станції, встановлені на відстані 50...100 км від можливого джерела радіоактивного забруднення. Для моніторингу в радіусі до 25 км використовують мережу контролю і спеціальні пости спостережень, де встановлюють датчики гамма-випромінювання та пристрої для відбору проб і аналізу повітря. У межах санітарно-захисної зони (СЗЗ) утворюють пости дистанційного контролю радіоактивного забруднення атмосферного повітря.

Моніторинг забруднення території на основі снігомірної зйомки (спостереження за забрудненням снігового покриву) забезпечує контроль за рівнем забруднення атмосферного повітря в чистих (фонових) районах, містах та інших населених пунктах.

Важливими методами контролювання транскордонного перенесення глобальних потоків домішок на великі відстані від місця викиду є система наземних та авіаційних станцій, а також математичні моделі поширення забруднюючих речовин в повітрі. Мережа станцій транскордонного перенесення обладнана системами відбору газу та аерозолів, збору сухих осідань і опадів, аналізу вмісту домішок у відібраних пробах. Інформація надходить у Західно- та Східноєвропейський метеорологічні синтезуючі центри. За ступенем оперативності її поділяють на такі види:

- екстрена інформація (містить відомості про різкі зміни рівнів забруднення атмосферного повітря, негайно передається в контролюючі та господарські організації);
- оперативна інформація (містить узагальнені результати спостережень за місяць);

- режимна інформація (містить дані про середній та найбільший рівні забруднення повітря протягом тривалого часу (як правило, за рік), використовується при плануванні заходів, оцінюванні збитків, завданих народному господарству внаслідок забруднення атмосферного повітря).

Для забезпечення ефективності заходів з охорони повітря інформація повинна бути повною і достовірною. Повноту інформації забезпечують достатня кількість контрольованих інгредієнтів, тривалий термін спостережень, раціональне розміщення мережі; достовірність інформації досягається неухильним дотриманням нормативних вимог. Значною мірою достовірність залежить від однорідності інформації.

Діюча в Україні мережа спостережень за забрудненням атмосферного повітря охоплює пости ручного відбору проб повітря й автоматизовані системи спостережень та контролю оточуючого середовища (АСКОС). Посты спостережень за забрудненнями можуть бути стаціонарними, маршрутними та пересувними (підфакельними). З постів ручного відбору проби для аналізу передають в хімічні лабораторії. Стаціонарні АСКОС обладнані пристроями для безперервного відбирання та аналізування проб повітря в заданому режимі й передавання інформації каналами зв'язку в центр управління.

Оцінювання забруднення атмосферного повітря в містах України здійснюють за даними спостережень, які проводять у 54 містах на 166 стаціонарних постах та на 2 станціях транскордонного переносу. Порівняно з 1997 р. помічено деяке зниження забруднення атмосферного повітря за більшістю домішок в Україні загалом і в окремих містах (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Вміст основних забруднюючих речовин в атмосферному повітрі за даними спостережень Держкомгідромету

Речовина	Кількість міст, включених до узагальнення	Середньорічна концентрація, мг/м ³	Максимальна концентрація, мг/м ³	Частка міст (%), де середньорічні концентрації перевищували:			Частка міст (%), де максимальні разові концентрації перевищували:		
				1 ГДК	5 ГДК	10 ГДК	1 ГДК	5 ГДК	10 ГДК
Пил	54	0,15	6,1	44	0	0	63	6	2
Діоксид сірки	52	0,021	0,656	6	0	0	4	0	0
Оксид вуглецю	48	2,1	32,0	17	0	0	69	4,2	0
Діоксид азоту	52	0,05	0,94	60	0	0	85	11	2
Оксид азоту	27	0,03	0,57	7	0	0	7	0	0
Аміак	23	0,035	0,82	26	0	0	56	0	0
Сірководень	17	0,003	0,066	ГДК с.д. не встановлена			76	12	0
Фенол	26	0,0038	0,05	46	0	0	77	0	0
Фтористий водень	16	0,0046	0,097	37	0	0	44	0	0
Формальдегід	23	0,0066	0,153	70	9	0	44	4	0
Хлористий водень	10	0,045	0,87	0	0	0	50	0	0

Раціонально організована система спостережень та контролю за станом атмосферного повітря дає змогу отримати необхідну інформацію про якісний склад повітря в населених пунктах і зонах впливу джерел викидів, про транскордонні перенесення забруднюючих речовин, виявити території, для яких характерні перевищення ГДК забруднюючих речовин. Наявність достовірних і комплексних даних спостережень є необхідною передумовою для розроблення рекомендацій

щодо поліпшення стану атмосфери.

3.2. Види постів спостережень, програми і терміни спостережень

Світові міжнародні та регіональні системи спостережень і контролю за забрудненням атмосферного повітря розвинутих країн організовані відповідно до рекомендацій ООН, які були розроблені при створенні програм моніторингу. Спостереження за станом атмосферного повітря проводять з 70-х років ХХ ст. Системи моніторингу атмосферного повітря різних країн, як правило, відстежують якість повітря та його зміни в критичних аварійних ситуаціях. Перелік забруднюючих речовин, за якими варто здійснювати спостереження, кожна країна визначає самостійно. Подібний підхід до організації системи спостереження за станом атмосферного повітря застосовують у країнах СНД і в Україні.

Закон України “Про охорону атмосферного повітря” (1992 р.) значно розширив функції служб спостереження та контролю за забрудненням атмосфери, які в своїй практиці використовують розрахункові і експериментальні (регулярні спостереження за концентраціями шкідливих домішок) методи. На основі теоретичних та експериментальних досліджень поширення домішок в атмосфері вироблено основні принципи організації мережі спостережень, лабораторного (хімічного) аналізу проб повітря, збирання, оброблення та узагальнення інформації про забруднення.

Інформацію про вміст забруднюючих речовин в повітрі надає мережа служби моніторингу. Відповідальність за її організацію покладена на Держкомгідромет України.

Якість повітря в населених пунктах контролюють стаціонарні, маршрутні і пересувні (підфакельні) пости спостереження.

Стаціонарний пост спостереження. Він призначений для регулярного відбору проб повітря з метою подальшого лабораторного аналізу, безперервного реєстрування вмісту забруднюючих речовин автоматичними газоаналізаторами. Мережа стаціонарних постів обладнана приміщеннями типу “ПОСТ” – утепленими дюралевими павільйонами, в яких встановлені комплекти приладів та обладнання для відбору проб повітря і вимірювання метеорологічних параметрів: температури, вологості, швидкості та напрямку вітру. Діючі типи павільйонів “ПОСТ-1”, “ПОСТ-2”, “ПОСТ-2а” відрізняються продуктивністю та ступенем автоматизації. Найпоширенішими є лабораторії типу “ПОСТ-2”.

Лабораторію комплекту типу “ПОСТ-2” використовують для стаціонарних спостережень за рівнем забруднення атмосферного повітря, а також для з’ясування метеорологічних характеристик. Вона забезпечує автоматичне вимірювання та фіксування на діаграмній стрічці концентрацій оксиду вуглецю і діоксиду сірки; автоматичний відбір 33 проб повітря для визначення 5 газоподібних домішок, сажі та пилу; ручний відбір 5 проб повітря на вміст газоподібних домішок, сажі і пилу; автоматичне вимірювання і реєстрацію напрямку та швидкості вітру, температури (-50 – $+50^{\circ}\text{C}$), вологості атмосферного повітря ($0\ldots 100\%$); контроль за температурою, вологістю і тиском атмосферного повітря за допомогою переносних приладів.

Комплект її технічних засобів містить:

- металевий каркас (павільйон) із зовнішніми та внутрішніми допоміжними

пристроями;

- прилади автоматичного контролю концентрацій забруднюючих речовин: газоаналізатори типу ГМК-3 (для визначення оксиду вуглецю) і типу ГКП-1 (для діоксиду сірки);

- групу приладів для автоматичного та ручного відбору проб повітря на вміст газоподібних домішок, сажі та пилу: електроаспіратори типу ЕА-1, ЕА-2, ЕА-2С і автоматичний повітровідбирач “Компонент”;

- групу приладів для автоматичного і ручного контролю метеопараметрів: анеморумбограф типу М-63-МР, Датчики температури і вологості.

Лабораторію “ПОСТ-2” обслуговує оператор, який реєструє значення температури, вологості, тиску. Вона може працювати в безперервному режимі або з перервами при півгодинному обслуговуванні оператором 2-4 рази на добу, одночасно контролюючи вміст у повітрі 2 забруднюючих речовин. За одне обслуговування забезпечується одночасний відбір 38 проб (за автоматичного відбору – 33, ручного – 5 проб). “ПОСТ-2” контролює 7 метеопараметрів (4 – при автоматичному вимірюванні з реєстрацією, 3 – при візуальному). Продуктивність лабораторії за чотириразового обслуговування протягом доби становить 50 тис. проб/год., середній термін служби – 10 років.

Серед стаціонарних постів виокремлюють опорні стаціонарні пости (призначені для виявлення довготривалих змін вмісту основних або найбільш поширених забруднюючих речовин) та неопорні стаціонарні пости (призначені для спостережень за спеціальними шкідливими речовинами, що характерні для контрольованої місцевості).

Кількість стаціонарних постів визначають залежно від чисельності населення (табл. 4.2), рельєфу місцевості, особливостей промисловості, змін концентрацій забруднюючих речовин.

Таблиця 4.2

Визначення кількості стаціонарних постів відповідно

Чисельність населення, тис. осіб	<50	50 - 100	100 - 200	200 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	>2000
Кількість постів, шт.	1	2	3	3-5	5-10	10-15	15-20

Стаціонарні пости спостережень можуть встановлюватись в житловій, промисловій, змішаній зонах та біля автомагістралей.

Маршрутний пост спостереження. Він призначений для регулярного відбору проб повітря у фіксованих точках місцевості за допомогою спеціально обладнаної автолабораторії. Маршрут щомісячно змінюється з таким розрахунком, щоб відбір проб повітря у кожному пункті проводився в різний час доби. Наприклад, протягом першого місяця машина об’їжджає пости в порядку зростання номерів, другого – в порядку їх спадання, третього – з середини маршруту до кінця і з початку до середини. Розміщення маршрутних постів повинно бути таким, щоб виявляти максимальні концентрації забруднюючих речовин, які формуються джерелом викиду. Визначаючи місця відбору проб, приймають до уваги висоту джерела викиду (H) і максимально можливу зону забруднення ним атмосферного повітря (K), яка дорівнює $20H$. Складають схему, центром якої є джерело викиду, навколо котрого будують кола з радіусами $0,5 \cdot K$; $1 \cdot H$; $1,5 \cdot H$ ($K = 20 \cdot H$, H – висота джерела викиду). У точках перетину кіл з проведеними з центра лініями, що позначають

сторони світу, відбирають проби повітря.

Підфакельний (пересувний) пост спостереження. Його використовують для відбору проб під димовим факелом з метою виявлення зони його впливу. Ці місця обирають з урахуванням закономірностей поширення забруднюючих речовин в атмосфері. Проби відбирають за переважаючим напрямком вітру на відстанях: 0,2; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 15; 20 км від джерела забруднення. Допоміжні точки встановлюють у зоні формування максимальної концентрації, на межі санітарної захисної зони (СЗЗ), на відстані СЗЗ + 200 м. На кожному колі по обидві сторони від осі факелу на відстані 1/25 К встановлюють ще по два пости. У зоні максимального забруднення відбирають не менше 60 проб повітря, а в інших зонах – до 25 на висоті 1,5 м від поверхні землі протягом 20...30 хв. не менше як у трьох точках одночасно.

Програми і терміни спостережень. Залежно від виду постів спостережень та їх завдань визначають програми і терміни спостережень. На стаціонарних постах спостереження за забрудненням атмосферного повітря та метеорологічними параметрами проводять протягом року, незалежно від погодних умов. Вони можуть працювати за повною, неповною, скороченою програмами спостережень.

За повною програмою спостереження проводять щоденно (неділя – вихідний, субота – чергується) о 1, 7, 13 та 19 год за місцевим часом або інколи використовують зміщений графік. Спостереження за цією програмою передбачають вимірювання вмісту в повітрі пилу, діоксиду сірки, оксиду вуглецю та оксидів азоту, а також тих речовин, концентрації яких перевищують ГДК.

За неповною програмою спостереження проводять Щоденно (субота і неділя чергуються) о 7, 13 та 19 год. У районах, де температура повітря нижча -45°C, спостереження проводять за скороченою програмою щоденно, крім неділі, о 7 та 13 год за місцевим часом.

Спостереження за скороченою програмою проводять у місцях, де середньомісячні концентрації менші за 1/20 ГДК(максимально разових).

Усі програми спостережень обов'язково охоплюють спостереження за метеопараметрами. За несприятливих погодних умов відбір проб повітря на всіх постах повинен проводитись через кожні 3 год.

Визначення концентрацій на маршрутних постах проводять за годинним графіком.

Діюча мережа спостережень за станом атмосферного повітря, сформована зі стаціонарних, маршрутних та підфакельних постів дає змогу контролювати забруднення повітря в населених пунктах, виявляти вплив джерел забруднення на певні території та викиди стаціонарних джерел забруднення. За сприяння системи постів встановлюють динаміку забруднення атмосфери, виявляють території, де зростає вміст забруднюючих речовин у повітрі, визначають небезпечні джерела викидів.

3.3. Лабораторії спостереження і контролю за забрудненням атмосферного повітря

В останнє десятиліття велика увага приділяється розвитку засобів контролю і охорони повітряного басейну. Намічено ряд конкретних організаційних заходів і

прийнята програма створення приладів і систем, що забезпечують надійний вимір, збір і обробку даних про рівень концентрації забруднюючих речовин в атмосфері.

Найбільш перспективним напрямом у розробці засобів контролю повітряного басейну з'явилося створення вимірювальних комплексів, що поєднують у єдине ціле прилади різного функціонального призначення, які дозволяють проводити аналіз концентрацій забруднювачів різними методами для широкого класу інгредієнтів.

Розробка вітчизняних засобів контролю атмосферних забруднень можна розділити на п'ять етапів:

- створення комплектних лабораторій для аналізу атмосферних забруднень (ІАЗ-1, ЛІВ-1);
- створення стаціонарної і пересувної лабораторії для контролю повітряного басейну в містах і промислових центрах ("ПОСТ", "Атмосфера");
- створення автоматизованих станцій контролю атмосферних забруднень ("Повітря-1", АСКЗА);
- створення пробних систем контролю атмосферних забруднень;
- створення промисловістю головної автоматизованої системи контролю атмосферних забруднень.

Серійний випуск засобів комплексного контролю атмосферних забруднень (ІАЗ-1 і ЛІВ-1) почався в 70-х роках. Включені до складу лабораторії аналітичні прилади і хімічне устаткування дозволяють робити відбір проб повітря і їх хімічний аналіз для широкого класу забруднювачів. До складу лабораторій входять засоби відбору проб повітря (аспіратори), засоби підготовки до аналізу, прилади контролю (хроматографи, газоаналізатори, спектрофотометри), а також лабораторний посуд і спеціальні меблі. Лабораторії розміщені на значній площі (70...100 м²), використовуються санітарно-епідеміологічною службою на промислових підприємствах і контролюють стан повітря в цехах і на території заводів. Лабораторію обслуговують 6-8 чоловік.

Лабораторія типу "ПОСТ". Необхідність контролю атмосферних забруднень у безпосередній близькості до житлових масивів і дослідження поширення забруднюючих речовин на територіях великих міст обумовила розробку спеціальної лабораторії з можливістю установки її на вулицях великих міст і промислових центрів. Такою лабораторією стала комплектна лабораторія типу "ПОСТ".

Лабораторії даного типу являють собою комплекс приладів і устаткування, розміщений у спеціальному павільйоні і дозволяють:

- контролювати вміст в атмосферному повітрі сірчистого газу і окису вуглецю інструментальними методами за допомогою газоаналізаторів;
- контролювати вміст окисів азоту, вуглеводнів, озону, пилу і інших домішок за допомогою ручного відбору проб повітря і наступного аналізу проб у хімічних лабораторіях;
- вимірювати супутні метеопараметри (швидкість і напрямок вітру, температура і вологість повітря і атмосферний тиск).

Павільйон являє собою твердий-металевий каркас, що обшитий стіновими панелями, облицьованими зовні штампованими алюмінієвими плитками ребристої форми. Архітектурні форми павільйону відповідають вимогам технічної естетики, пропонованими до споруджень малих архітектурних форм у містах. З внутрішньої сторони павільйон обшивається декоративно обробленою столярною плитою. Як

ущільнювач використовується полістирольний пінопласт, розташований між внутрішньою і зовнішньою плитами.

Дах павільйону ізолюваний від атмосферних опадів, на ньому поміщена щогла з датчиком, що визначає напрямок і швидкість вітру. Технічне устаткування в павільйоні укріплено на спеціальних полках. Габаритні розміри павільйону 2095x2095x2870 мм, маса 2300 кг. Температура в павільйоні підтримується автоматично за допомогою двох нагрівальних печей типу ПЕТ-7 і температурного датчика типу ДТКБ. Люмінесцентні світильники забезпечують освітлення не менше 200 лк.

Відбір проб повітря на задані газові інгредієнти здійснюється через повітровідбірник, виведений назовні через стелю і дах павільйону. Для захисту вхідного отвору від вологи встановлений поліетиленовий ковпачок із сіткою. Повітровідбірник установлений на висоті 500 мм над дахом павільйону щоб уникнути впливу матеріалу даху і снігового покриву на виміри. Газова схема відбору проб повітря приведена на рис. 4.1.

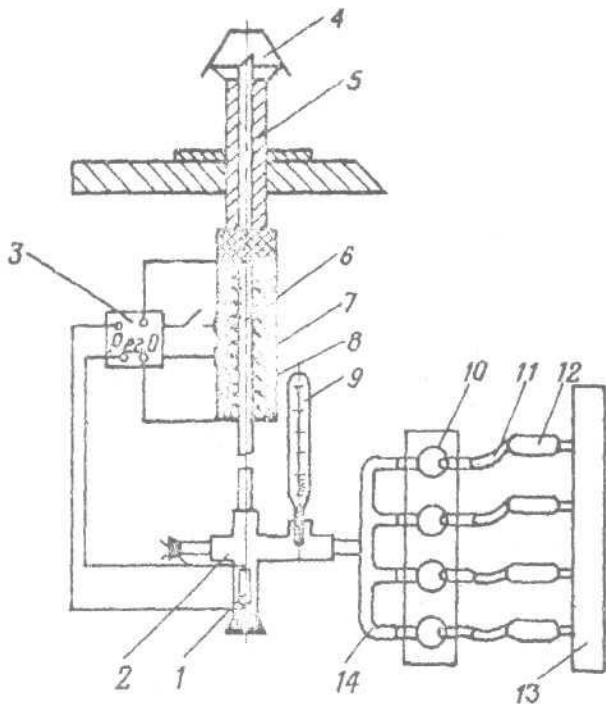


Рис. 4.1. Газова схема відбору проб повітря комплектної лабораторії ПОСТ-1

1 – температурний датчик; 2 – трійник; 3 – регулятор температури; 4 – захисний ковпачок; 5 – металева труба; 6 – фторопластова трубка; 7 – нагрівачі; 8 – теплоізоляція; 9 – термометр; 10 – поглинальні прилади; 11 – гумовий шланг; 12 – захисний патрон; 13 – електроаспіратор; 14 – розподільна гребінка

Повітря, що надходить через зовнішню частину забірної пристрою захищеного від атмосферних опадів ковпачком (4), проходить через нагрівальний елемент, що підігріває повітря в зимових умовах до позитивних температур. Чуттєвий елемент (датчик) системи підігріву проб повітря (1) розташований у трійнику (2) газової магістралі павільйону. Контроль

температури повітря в газовій магістралі здійснюється за допомогою термометра (9). Регулятор (3) перетворює сигнал від чуттєвого елемента в сигнали керування обмоткою реле, контакти якого знаходяться в ланцюзі живлення нагрівального елемента. Повітрозабірний пристрій закінчується фторопластовою розподільною гребінкою, за допомогою штучерів якої приєднані поглинальні прилади і газоаналізатори. Аспірацію повітря забезпечує електроаспіратор моделі 822.

Відбір проб повітря на пил і сажу виконується через люки, які розташовані на висоті 1,5 м від землі в стінках павільйону. Для зручності експлуатації елементи відбору проб на пил і сажу об'єднані в один загальний блок. Витрати повітря вимірюються за допомогою ротаметричного індикатора типу РС-7, для забезпечення температурного режиму якого в зимовий час включається підігрівач з

терморегулятором.

Швидкість і напрямок вітру визначаються за допомогою датчика метеостанції М-49. Вимірювальний пульт приладу встановлений всередині павільйону на робочому столі спостерігача, а приймальна частина (датчики) – над дахом павільйону на щоглі.

Вимірювання температури і вологості повітря здійснюється за допомогою відповідних датчиків метеостанції М-49. Вони поміщені в ніші Павільйону на висоті 2 м. На час вимірів датчики висувуються на відстань до 1,5 м від стінки павільйону за допомогою штанги, на якій вони кріпляються. Пульт вимірів метеорологічних параметрів розміщений у павільйоні на робочому столі оператора.

Важливою частиною вирішення проблеми контролю атмосферних забруднень стало застосування в лабораторії типу “ПОСТ-1” приладів автоматичної реєстрації шкідливих домішок в атмосфері. Їх впровадження дозволило істотно збільшити інформацію про забруднювачі, забезпечило передумови для створення автоматизованих систем контролю атмосферних забруднень. До складу лабораторії входять два автоматичних газоаналізатора: кулонополярнографічний типу ГКП-1 для визначення концентрацій двоокису сірки в атмосфері й оптико-акустичний типу ГМК-3 для визначення концентрацій окису вуглецю.

Визначення концентрації двоокису сірки газоаналізатором типу ГКП-1 засновано на вимірі величини граничного струму, що виникає при окислюванні на платиновому електроді йодистого водню, що утворюється при взаємодії двоокису сірки з йодом. Цей прилад має достатню чутливість, порівняно простий і компактний. Газоаналізатор має чотири діапазони виміру двоокису сірки: 0-1, 0-2, 0-5, 0-10 мг/м³; переключення діапазонів виміру – ручне. Основна приведена погрішність газоаналізатора – не більше 20% від діапазону виміру. Недоліком газоаналізатора є значний вплив на його показання домішок сірководню в аналізованому повітрі.

Дія оптико-акустичного газоаналізатора типу ГМК-3 заснована на вимірі степеня поглинання окисом вуглецю інфрачервоного випромінювання. Газоаналізатор призначений для визначення концентрацій окису вуглецю в атмосфері в межах 0-400 мг/м³ з погрішністю не більш 10% від діапазону виміру. Реєстрація інформації від газоаналізаторів виробляється на самописах типу КСП-004.

Лабораторія має ряд недоліків: невелика степінь автоматизації процесів відбору проб і вимірів, триразове обслуговування протягом доби, потреба в попередній обробці вимірів для наступної машинної обробки. Крім того, задача локалізації джерел промислових викидів в атмосферу вимагає установки значного числа постів у великих містах країни для одержання повної картини поширення забруднень. Для усунення всіх перерахованих недоліків була розроблена і впроваджена пересувна лабораторія контролю атмосферного повітря “Атмосфера-ІІ”.

Пересувна лабораторія “Атмосфера-ІІ”. Лабораторія здійснює: контроль за забрудненням атмосферного повітря в зонах розміщення промислових об’єктів, спостереження за поширенням шкідливих речовин від промислових джерел, а також контроль метеорологічних параметрів в зоні спостереження.

Лабораторія застосовується в системі Держкомгідромета й в організаціях, що здійснюють контроль атмосферних забруднень.

Прилади й устаткування лабораторії дозволяють робити одночасний відбір чотирьох-шести проб повітря на обрані газові інгредієнти, відбір проб на пил і сажу, інструментальний аналіз сірчастого газу, сірководню, озону і хлору.

До складу лабораторії входять: автомашина типу УАЗ, газоаналізатор кулонополярнографічний типу ГKP-1, газоаналізатор “Атмосфера-II”, анеморумбометр типу М-47, барометр-анероїд типу М-67, психрометр типу МВ-4М, лічильник газовий типу РГ-40, аспіратор моделі 822, пилосос “Вихор”, компас гірський ГК-2, настановне устаткування (стенди) і засоби життєзабезпечення, що дозволяють експлуатувати лабораторію в будь-який час року і доби (додаток).

Устаткування лабораторії “Атмосфера-II” змонтовано на кузові автофургона типу УАЗ. Салон автофургона розділено спеціальною перегородкою на два відсіки – приладовий і допоміжний. У приладовому відсіку розміщені прилади й устаткування для відбору проб повітря на газові домішки, пил і сажу, а також прилади інструментального аналізу. У допоміжному відсіку розміщені розподільний щит, утримувач пилового і сажевого патронів, кабельна котушка й акумуляторні батареї “виносних” пунктів.

На даху автофургона закріплена зйомна платформа, на якій розміщені піднімальна щогла для установки в робоче положення датчика вітру анеморумбометра і висувна штанга утримувача.

Для транспортування вимірювальних приладів до місця спостереження, а також для їх захисту від ударів і вібрації в лабораторії передбачена система індивідуальної і групової амортизації.

Для зручності обслуговування прилади й устаткування лабораторії підрозділяються на наступні експлуатаційні групи:

- відбору проб повітря на газові домішки, пил і сажу;
- інструментального аналізу;
- контролю метеорологічних параметрів;
- “виносних” пунктів;
- електропостачання;
- опалення і освітлення.

Основне устаткування лабораторії змонтоване на спеціальних стендах, що розташовані по периметру приладового відсіку автомашини для зручності роботи оператора.

Схема розміщення приладів всередині кузова автомашини приведена на рис. 4.2.

На передньому стенді встановлені основні вимірювальні і контролюючі прилади лабораторії (газоаналізатор типу ГKP-1,

показчик параметрів анеморумбометра, контрольний годинник оператора і т.д.).

Рис. 4.2. Схема розміщення устаткування пересувної лабораторії “Атмосфера-II”
 1 – збуджувач витрати аспілятора моделі 822; 2 – ротаметр РГ-40; 3 – терморегулятор; 4 – аспіратор моделі 822; 5 – шафа; 6 – барометр; 7 – газоаналізатор ГKP-1; 8 – пульт керування; 9 – самописець; 10 – пульт керування М-47; 11 – шафа з виносними Приладами; 12 – газоаналізатор “Атмосфера-II”; 13, 15 – аспіратори ЛК-1; 14 – газоаналізатор “Атмосфера-I”

Проби повітря на газові домішки, пил і сажу відбираються за допомогою аспіраторів і пиłosоса під час стоянки автомашини. Відбір проб на газові домішки виконується одночасно в трьох точках (із відсіку приладів лабораторії і на двох “виносних” пунктах). Проходячи через поглинальні прилади, проби повітря на газові суміші вступають у взаємодію з поглинальним розчином, а частки пилу і сажі залишаються на фільтрах. Потім у стаціонарних умовах проводять лабораторний аналіз відібраних проб і, одночасно, інструментальний аналіз сірчистого газу, сірководню, озону і хлору та контроль метеопараметрів.

Електроживлення подається від міської мережі змінного струму (напруга 220 В, частота 50 Гц) на розподільний щит лабораторії за допомогою гнучкого переносного кабелю, намотаного на спеціальну котушку в допоміжному відсіку. На розподільному щиті наявний пакетний перемикач (для підключення до мережі живлення – автомат типу АЕ-1000), що забезпечує захист мережі лабораторії від перевантажень, і розетки для включення переносних ламп.

З розподільного щита живлення подається на пульт керування, на якому розташовані амперметр і вольтметр, що контролюють параметри мережі живлення, а також тумблери вмикання устаткування і сигнальні лампочки. З пульта керування живлення подається на спеціальні перехідні колодки, на яких закріплені штепсельні розетки.

Для забезпечення надійного захисту обслуговуючого персоналу від ураження струмом кожен споживач електроенергії з'єднаний заземлюючим дротом з контуром заземлення, що має вихід на розподільний щит лабораторії. Для забезпечення захисного заземлення при роботі лабораторії на місцевості використовується спеціальний електрод, що заглиблюється в ґрунт на всю довжину і з'єднується з контуром заземлення спеціальним провідником.

Відбір проб повітря на газові домішки виконується за допомогою аспіраторів моделі 822 по двох каналах: вертикальному (з висоти 2,5 м від рівня землі через фторопластовий трубопровід і виведений на дах автофургону повітровідбірник) і горизонтальному (через виносний держак, укріплений на висувній штанзі). Обидва канали мають загальний нагрівник, що автоматично вмикається при температурах зовнішнього повітря нижче 5°C. Через розподільник повітря надходить на поглинальні прилади, встановлені в штативах. Уся система має загальний перемикач повітряних магістралей, який слугує для зміни точки забору атмосферного повітря.

Відбір проб повітря на пил виконується за допомогою пиłosосі. Повітря протягом 20 хв проходить через пиловий патрон, закріплений в держаку. Витрата повітря визначається газовим лічильником, а час – секундоміром. При температурі в точці відбору проби нижче 5°C виробляється автоматичний підігрів проби нагрівником. Потім фільтр виймають з патрона і зважують.

Відбір проб повітря на сажу виробляється за допомогою одного з аспіраторів моделі 822. “Сажевий” патрон закріплюється у держаку і з'єднується з аспіратором гумовою трубкою.

Інструментальний аналіз сірчистого газу виконується за допомогою газоаналізатора типу ГКП-1. Прилад приєднується до розподільника за допомогою фторопластової трубки.

Відбір проб і аналіз на сірководень, озон і хлор проводиться на виносних пунктах за допомогою газоаналізаторів “Атмосфера”.

Вимір метеорологічних параметрів здійснюється за допомогою анеморумбометра типу М-47. Датчик швидкості і напрямку вітру анеморумбометра на час вимірів монтується на спеціальній щоглі, закріпленій на зйомній платформі. Щогла має можливість повороту у вертикальній площині на 90°. Значення швидкості і напрямку вітру відображаються на показнику метеопараметрів анеморумбометра, встановленому в приладовому відсіку.

Температура і вологість повітря вимірюються за допомогою виносного психрометра типу МВ-4М.

Одночасно з розвитком пересувних засобів контролю атмосфери-РЧ були початі роботи з удосконалювання стаціонарних засобів контролю. Основні задачі цього етапу: підвищення автономності роботи комплексів і степені автоматизації вимірів і відбору проб, одержання інформації про забруднювачі і метеопараметри у вигляді, придатному для безпосереднього введення в ЕОМ, підвищення інформаційної продуктивності технічних засобів станції.

На шляху вирішення цих задач, що дозволяють підняти процес контролю атмосферних забруднень на якісно нову ступінь, з'явилася розробка автоматизованої станції контролю атмосферних забруднень "Повітря-1", що пройшла у даний час стадію промислового освоєння.

Станція контролю атмосферних забруднень "Повітря-1". Станція "Повітря-1" являє собою комплекс приладів і устаткування, розміщений у спеціальному павільйоні і призначений для вирішення задач інструментального аналізу атмосферного повітря на двоокис сірки і окис вуглеводню за допомогою автоматичних газоаналізаторів; автоматичного відбору проб повітря для наступного хіманаліза одночасно на чотири газових інгредієнти і пил; виміру супутніх метеопараметрів (швидкість і напрямок вітру, температура, вологість і тиск атмосферного повітря); реєстрації інформації від первинних датчиків на друкуючому обладнанні (додаток).

Структура технічних засобів станції приведена на рис. 4.3. Технічні засоби станції можуть бути розділені на чотири групи:

- засоби електропостачання і життєзабезпечення;
- засоби, призначені для одержання, перетворення і реєстрації інформації на друкуючому обладнанні;
- засоби відбору проб атмосферного повітря для наступного лабораторного аналізу;
- засоби, призначені для візуального відображення інформації.

До першої групи відносяться технічні засоби розподілу електроенергії між споживачами станції і засоби забезпечення необхідного кліматичного режиму всередині павільйону, до другої – газоаналізатори на двоокис сірки й окис вуглецю (ГІАМ-1 і ГКП-1), анеморумбограф типу М63МР і група засобів перетворення інформації, що входять до складу стійки приладів, а також принтер типу ПР-150, до третьої – засоби ручного й автоматичного відбору проб атмосферного повітря (повітровідбірник "Компонент" і електроаспіратори типів ЕА-1 і ЕА-2), до четвертої – прилади стрілочного типу (метеостанція М-49 (без датчика вітру) і барометр-анероїд).

Повітровідбірник "Компонент" працює автоматично, запуск виробляється один раз на добу оператором.

Електроаспіратори типів ЕА-1 і ЕА-2 призначені для відбору проб атмосферного повітря в присутності оператора протягом 20 хв з моменту їх пуску. Стрілочні прилади, що входять до складу метеостанції М-49, і барометр-анероїд дозволяють здійснювати візуальне знімання інформації з записом відповідних показань приладів оператором.

Павільйон станції “Повітря-1” аналогічний по своєму пристрою і зовнішньому оформленню павільйону лабораторії ПОСТ-1, однак відрізняється від нього великими габаритними розмірами (2200x4500x2900 мм), що дозволило розмістити всередині станції додаткові технічні засоби виміру й автоматичного відбору проб.

На даху павільйону встановлена щогла з датчиком швидкості і напрямку вітру і психрометрична будка з датчиком температури і вологості.

Для визначення концентрації сірчистого газу в атмосферному повітрі використовується газоаналізатор кулонополярнографічний типу ГПП-1, інформація від якого реєструється на стрічці самописного потенціометра типу КСП-004 і одночасно надходить на перетворення і реєстрацію на друкуючому обладнанні. Газоаналізатор розміщений у спеціальній стійці.

Газоаналізатор типу ГІАМ-1, який використовується для визначення концентрації окису вуглецю, має вихідний уніфікований сигнал 0...5 мА. У газоаналізаторі використано оптико-акустичний метод аналізу газу, який засновано на вимірі поглинання променистої енергії і використанні його для визначення концентрації газів, що мають смуги поглинання в інфрачервоній області спектру. Вимір здійснюється в інфрачервоній області спектра. Вимір проводиться в трьох діапазонах концентрації: 0...40, 0...80, 0...400 мг/м³. Габаритні розміри газоаналізатора 600x650x1700 мм, маса 250 кг. Споживана потужність не більш 2,5 кВт.

У павільйоні передбачені газові магістралі для підключення і місця для розміщення додаткових газоаналізаторів, які встановлюються споживачем (для контролю сірчистого газу, озону, вуглеводнів і окисів азоту).

Для ручного відбору проб повітря на задані газові інгредієнти використовується електроаспіратор типу ЕА-1 з вбудованим витратоміром, що здійснює проходження аналізуемого повітря через поглиначі. Обсяг повітря, необхідний для аналізу, дорівнює добутку часу відбору на швидкість аспірації (додаток).

Відбір повітря на пил здійснюється електроаспіратором типу ЕА-2, що здійснює проходження аналізуемого повітря протягом визначеного часу з визначеною швидкістю через фільтруючий елемент, на якому вловлюється пил. При цьому замірюється кількість протягнутого через аспіратор повітря і його температура. В якості фільтруючого елементу використовується фільтр Петрянова, що представляє собою рівномірний шар ультратонких волокон із полімерів (додаток).

Для виміру, метеопараметрів на станції встановлені:

- датчики температури і вологості метеостанції М-49, що дозволяють вимірювати температуру повітря від -55 до +45°C і відносну вологість 30...100% (інформація відображається на пульті керування метеостанції);
- анеморумбограф типу М63МР, призначений для виміру швидкості і напрямку вітру, інформація від якого надходить у вигляді сигналу напруги постійного струму з рівнем 0...100 мВ і реєструється на стрічці автоматичного потенціометра й

одночасно надходить у пристрій реєстрації інформації на друкуючому обладнанні. Анеморумбограф забезпечує виміри швидкості вітру до 60 м/с і напрямку вітру в межах 0...360°.

Для автоматичного відбору проб повітря з метою їхнього наступного аналізу в хімічних лабораторіях на задані газові інгредієнти до складу технічних засобів станції включений повітровідбірник “Компонент”, який являє собою стійку з встановленими в ній поглиначами і розміщеними усередині неї газовими магістралями і пристроями завдання, забезпечення і контролю режиму відбору проб. Аспірацію повітря виконує компресорна установка, яка розміщена окремо від стійки (рис. 4.3).

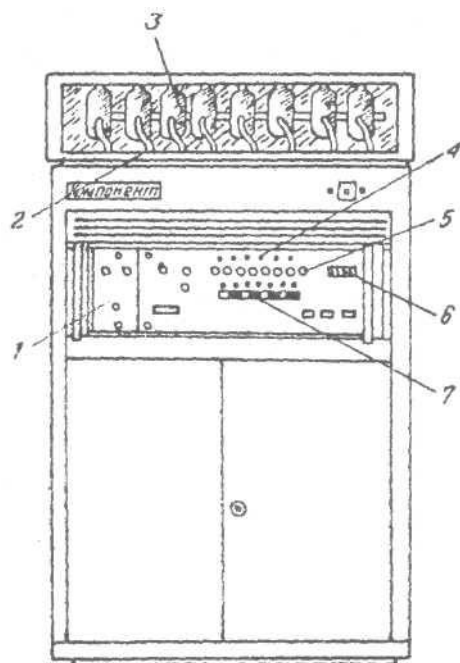


Рис. 4.3. Зовнішній вигляд стійки повітровідбірника “Компонент”

1 – регулятор; 2 – блок поглинальних приладів; 3 – поглинальні прилади; 4 – блок реле; 5 – аварійна сигналізація, 6 – лічильник проб; 7 – клавіатура вибору проби

Повітровідбірник “Компонент” може бути використаний не тільки в складі станції “Повітря-1”, але і як самостійний прилад для автоматичного відбору проб повітря. Повітровідбірник дозволяє скоротити кількість обслуговуючого персоналу в порівнянні з електроаспіраторами типу ЕА-1 і значно збільшити число проб, що відбираються одним приладом протягом доби.

Повітровідбірник може працювати в трьох режимах:

- 1) автоматичному, з відбором восьми проб протягом циклу по заданій програмі;
- 2) ручному, з відбором проб на вибір оператора;
- 3) середньодобовому, з відбором восьми проб через

один з обраних поглиначів.

Оператор, що обслуговує установку, робить один раз на добу зміну поглиначів і запуск установки на наступний цикл.

Таким чином, станція “Повітря-1” є ефективною ланкою в мережі спостереження і контролю атмосферних забруднень, що забезпечує автоматичне одержання проб для наступного хімічного аналізу й автоматичну реєстрацію контролюємих параметрів для їх подальшої обробки в регіональних центрах.

3.4. Автоматизовані системи спостереження і контролю за станом атмосферного повітря

Автоматизовані системи спостереження і контролю за станом атмосферного повітря (АСКНС-АГ) або (АНКОС-АГ) призначені для постійного контролю за змінними у часі та просторі характеристиками забруднення і метеорологічними параметрами повітряного простору. Залежно від характеру та об’єму робіт їх поділяють на такі типи:

- 1) промислові системи. Вони контролюють викиди промислових підприємств,

ступінь забруднення промислових майданчиків і прилеглих до них територій. Оснащені датчиками для фіксування характерних інгредієнтів викидів підприємств, а також метеодатчиками, які розміщують з урахуванням шкідливості викидів, рози вітрів, особливостей розміщення житлових масивів. За звичай, такі системи функціонують у структурі підприємств;

2) міські системи. Їх призначено для контролювання рівня забруднення повітря міста викидами підприємств, транспорту, для вимірювання метеопараметрів. Завдяки їх функціонуванню встановлюють розмір забруднення територій з урахуванням сезону року і кліматичних факторів, параметри і частку кожного джерела забруднення, прогнозують небезпечність ситуації. Системи формуються з двох рівнів. На I рівні здійснюють вимірювання концентрацій забруднюючих речовин і деяких метеопараметрів, перетворення вимірних значень фізичних величин, реєстрацію цих значень на машинних носіях, формування повідомлень і збереження інформації. На цьому рівні типові автоматичні станції визначають основні забруднювачі: CO – оксид вуглецю ($0 \dots 160 \text{ мг/м}^3$); SO₂ – діоксиду сірки ($0 \dots 5 \text{ мг/м}^3$); NO₂, NO та суму оксидів азоту ($0 \dots 7,5 \text{ мг/м}^3$); суму вуглеводнів за винятком метану ($0 \dots 45 \text{ мг/м}^3$); O₃ – озон ($0 \dots 0,15 \text{ мг/м}^3$); метеопараметри: швидкість, напрямок вітру, температуру повітря. Завершується перший рівень передачею даних в центр обробки інформації.

На II рівень інформація надходить від пересувних постів, стаціонарних газоаналітичних лабораторій. На цьому рівні обробляють результати, прогнозують небезпечні ситуації, розраховують необхідні результати і передають споживачам.

Міська система автоматичного спостереження і центр оброблення даних забезпечують систематичне вимірювання заданих параметрів, автоматичний збір інформації з автоматизованих станцій, збирання інформації від неавтоматизованих ланок спостереження, оперативне оцінювання ситуації, короткостроковий прогноз.

Аналіз даних про концентрацію домішок триває не менше 20...30 хв., що відповідає терміну відбору проб в поглинальні прилади. Видавання автоматизованою системою інформації може тривати від кількох хвилин до кількох годин.

У міську систему включені промислові автоматизовані підсистеми;

3) регіональні системи. Переважно вони не мають своїх контрольно-замірювальних станцій, а отримують інформацію з міських і промислових систем. Призначені для статистичної обробки і аналізу даних про забруднення навколишнього природного середовища на значних територіях, на базі яких проводять дослідження та прогнозування, розробляють науково обґрунтовані рекомендації щодо його охорони;

4) загальнодержавні системи. Вони отримують відомості про забруднення та стан атмосферного повітря від регіональних систем, супутників Землі та космічних орбітальних станцій;

5) глобальні системи. Їх використовують для досліджень атмосферних змін на основі міжнародних спостережень.

Автоматизовані системи спостереження і контролювання атмосферного повітря різних типів обов'язково оснащені автоматичними системами відбору проб та приладами автоматичного визначення забруднюючих речовин (газоаналізаторами).

Газоаналізатори та їх характеристика. На стаціонарних пунктах спостереження

за забрудненням атмосферного повітря (ПСЗ) найчастіше використовують газоаналізатори (прилади для визначення якісного та кількісного складу газової суміші), які дають змогу в автоматичному режимі визначати і записувати на діаграмну стрічку концентрації певних речовин протягом доби. Найчастіше використовують газоаналізатори різних типів для визначення діоксиду сірки, оксиду вуглецю, оксидів азоту, вуглеводнів і озону.

Газоаналізатор ГКП-1. Автоматичний кулонополярографічний газоаналізатор ГКП-1 призначений для виявлення в повітрі концентрації діоксиду сірки. Основним його елементом є датчик, що містить такі вузли:

- систему забору й очищення повітря від пилу (забірний пристрій на корпусі датчика, протипиловий фільтр ФГ-6 на каретці, дві з'єднувальні фторопластові трубки);
- електрохімічну чарунку з оргскла (рис. 4.4);
- систему підтримки постійної витрати (50 ± 4 л/год або $0,83 \pm 0,07$ л/хв.), що забезпечує прокачування повітря через електрохімічну чарунку;
- систему термостатування, що забезпечує підтримку всередині датчика постійної температури $18 \dots 20^\circ\text{C}$ при роботі в зимових умовах.

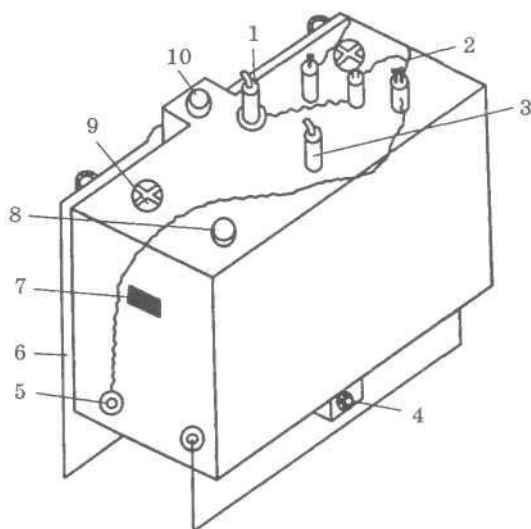


Рис. 4.4. Електрохімічна чарунка

кулонополярографічного газоаналізатора

1 – вхідний штуцер; 2 – електроди; 3 – штуцер для виходу повітря; 4 – відвід для зливу кислоти; 5 – порівнювальні електроди; 6 – задня стінка чарунки; 7 – верхня мітка рівня кислоти; 8 – камера для запасного електроліту; 9 – вертикальний канал для заливання кислоти (3% або 5% водний розчин H_2SO_4) та засипання електродної суміші (піролюзит з вугіллям); 10 – канал для засипання йоду (фракція $2 \dots 3$ мм).

Перед початком роботи необхідно перевірити справність газоаналізатора. Після увімкнення його в мережу перемикач шкал встановлюють на діапазоні $0 \dots 10 \text{ мг/м}^3$.

При цьому можливі дві неробочі ситуації: зашкалювання стрілки потенціометра ліворуч, праворуч або встановлення на значеннях, близьких до крайніх праворуч ($20 \dots 30$ поділок). При зашкалюванні стрілки ліворуч необхідно поміняти місцями проводи робочого сигналу на затискачах чарунки, праворуч (датчик недавно заправлений реактивами) – залишити працювати прилад на $24 \dots 36$ год., встановивши перемикач в положення “КЗ”. Потім слід перевірити значення витрат повітря, фонового струму, герметичності датчика, достовірність значень газоаналізатора, систему термостатування (у зимовий період).

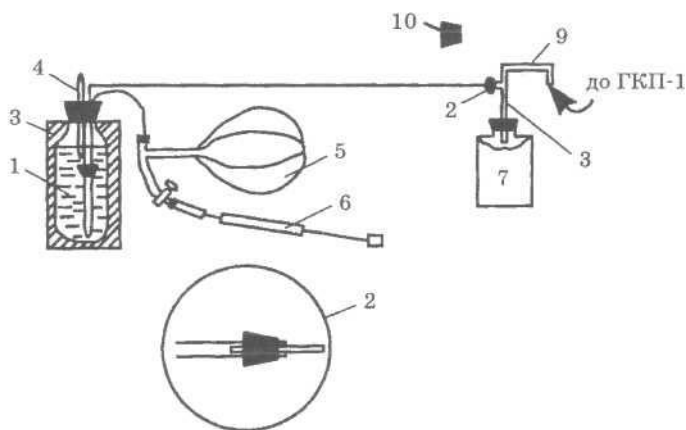
При перевірці обсягу витрати повітря і герметичності датчика користуються заздалегідь відкаліброваним ротаметром, який під'єднують до вхідного штуцера на верхній кришці датчика. Якщо витрата нижче за норму, ротаметр приєднують до вихідного штуцера чарунки. Нормативна витрата повітря на вихідному штуцері і занижена на вхідному свідчать про порушення герметичності внаслідок неповного з'єднання каретки і корпусу датчика. Якщо на вихідному штуцері також виявлено занижену витрату повітря, потрібно приєднати ротаметр до вихідного штуцера

тонкого очищення, від'єднавши повітровід. Нормативна витрата повітря свідчить про негерметичність системи “електрохімічна чарунка – фільтр грубого очищення”, зумовлену посиленням опору чарунки внаслідок забруднення отвору вимірювального електрода або фільтра грубого очищення при відпрацюванні латунної стружки й осаду солі на ній. Ці дефекти можна усунути, промивши електрод етиловим спиртом і дистильованою водою та перезарядивши фільтр грубого очищення. Якщо витрата повітря виявилася заниженою і на вході фільтра тонкого очищення, слід перевірити, чи не забитий фільтр, чи немає тріщин в корпусі та ін. Не встановивши причин візуально, витрату повітря регулюють за допомогою регулювального гвинта “Р” на корпусі СРГ-5.

Контроль “нуля” приладу (значення фоновому струму) є важливим елементом експлуатації ГКП-1. Фоновий струм справного приладу по шкалі $0...1 \text{ мг/м}^3$ повинен перебувати в інтервалі $3...30$ поділок. При перевищенні 30 поділок (електрохімічна чарунка сильно забруднена) чарунку промивають і перезаряджають. Потім знов встановлюють “нуль”.

Іноді внаслідок тривалої і безперервної роботи ГКП-1 чутливість електрохімічної чарунки погіршується, внаслідок чого занижуються значення концентрації діоксиду сірки в атмосферному повітрі. У цьому разі для перевірки справності приладу використовують дозатор діоксиду сірки (рис. 4.5), порівнюючи покази газоаналізатора ГКП-1 з показами контрольного приладу або з результатами хімічного аналізу.

Рис. 4.5. Дозатор діоксиду сірки
1 – дифузійна чарунка (пробірка діаметром $20...30 \text{ мм}$, довжиною $100...200 \text{ мм}$, заповнена еквімолекулярною сумішшю кристалічних сульфату натрію й щавлевої кислоти або насиченим водним розчином діоксиду сірки); 2 – дозатор – вихідний скляний капіляр, що вводять у трійник під час подачі діоксиду сірки при перевірці приладу (дозатор забезпечує витрату повітря 5 мл/хв.); 3 – термостат; 4 – термометр; 5 – джерело стиснутого повітря (камера гумова); 6 – ручний насос; 7 – фільтр; 8 – газозмішувача лінія; 9 – з'єднувальна трубка; 10 – заглушка, що встановлюється замість дозатора 2 після перевірки приладу



Підключивши за допомогою з'єднувальної трубки 9 дозатор до датчика ГКП-1, визначають “нуль” приладу.

Спочатку це роблять при закритому заглушкою відводі трійника, а потім замість заглушки в газозмішувач вводять вихідний капіляр дозатора і через $15...20 \text{ хв}$ встановлюють покази. Абсолютне значення концентрації визначають шляхом обчислення нуля. Дозатор попередньо градуують або контрольным приладом, або хімічним методом.

Для градуювання дозатора хімічним методом (турбодиметричним) готують $5...7$ пробірок з 5 мл поглинального розчину (пероксид водню або хлорат калію) в кожній. Капіляр від дозатора занурюють до самого дна в пробірку на $30...50 \text{ хв}$. У

пробірку набирають 25...30 мкг діоксиду сірки. Відібрані проби аналізують і розраховують середнє значення оптичної щільності. Розбіжність отриманих значень концентрації в 5...7 пробірках не повинна перевищувати $\pm 15\%$. За градуїованим графіком знаходять середню кількість діоксиду сірки в пробі (мкг) і визначають концентрацію в мкг/л або мг/м³ за формулою:

$$C = \gamma / (0,83 \cdot t)$$

де γ – кількість газу, мкг;

t – час відбору проби, хв;

0,83 л/хв – витрата повітря газоаналізатором.

Покази газоаналізатора, що перевіряється, не повинні бути нижчі від отриманих хімічним методом, в іншому разі електрохімічну чарунку необхідно перезарядити. Перед перевіркою дозатор повинен бути увімкнений і працювати не менше 5...6 год. за безперервного пропуску повітря, тобто в холостому режимі відповідно до регламенту.

При експлуатації газоаналізатора ГКП-1 необхідно своєчасно проводити профілактичні роботи. Для цього кожні 2...3 дні оглядають його ззовні, контролюють нульову лінію, корегують час просування стрічки. Один раз на тиждень дозаправляють чарунки електролітом, досипають суміш піролюзита з вугіллям, перевіряють витрати повітря і правильність показників. Щомісяця, а влітку двічі на місяць, здійснюють:

- промивання допоміжних електродів і засипання свіжої суміші. Йод засипають маленькими порціями через спеціальний канал доти, поки його шар не торкнеться нижньої поверхні електрода, а дистильовану воду доливають в камеру із запасним електродом до верхньої помітки. Оскільки після цього фоновий струм може зрости, перевіряють нульове значення приладу. Якщо воно більше 20 малих поділок шкали “0...1”, прилад вмикають вхолосту на кілька годин до зменшення нульового значення (перемикач поставити в положення “КЗ”). Після установки постійної нульової лінії необхідно перевірити чутливість чарунки за допомогою дозатора;

- повне перезарядження чарунки і перевірка її фонового струму, перезарядження фільтра грубого очищення, профілактичний ремонт потенціометра. Крім того, один раз у квартал перезаряджають фільтр тонкого очищення і промивають зовнішні і внутрішні забірні лінії розчином будь-якого синтетичного миючого засобу, гарячою водою, спиртом, холодною водою.

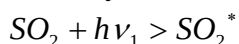
Концентрації діоксиду сірки, що вимірюють за допомогою ГКП-1, записують на стандартній спеціальній стрічці самописця. Для діапазону вимірювань 0...10 мг/м³ ціна поділки на стрічці дорівнює 0,01 мг/м³, для діапазону 10...100 мг/м – 0,1 мг/м³.

Для того щоб обробити стрічку самописця, її треба відрізати. На ній повинні бути зафіксовані: найменування міста, номер поста спостережень, рік, місяць, число. Ці дані записуються у сітки, які вказують початок доби, між ординатами в 24 або 01 год. Операції по обробці стрічки самописця і форма заповнення журналу аналогічні до таких процедур для ГМК-3.

Метрологічне обслуговування ГКП-1 здійснюється відповідно до вимог “Тимчасової інструкції по організації обслуговування газоаналізатора ГКП-1 на мережі спостережень Держкомгідромету”.

Газоаналізатор 667ФФ. Автоматичний газоаналізатор 667ФФ призначений для

забезпечення інструментального контролю за концентрацією діоксиду сірки. Принципом його роботи є флюоресцентний метод, суть якого полягає в реєстрації флюоресцентного випромінювання молекул діоксиду сірки, яке виникає під дією ультрафіолетового випромінювання. Збудження молекул діоксиду сірки відбувається в спектральній області 220...240 нм, яка виділяється за допомогою первинного світлофільтра із спектра випромінювання імпульсної ксенонової лампи ІСК 20-1. У спектральній області 220...240 нм молекули води й оксидів азоту не впливають на флюоресценцію. Процес збудження описується формулою:



де h – постійна Планка;

ν_1 – частота коливань збуджуючого випромінювання.

Збуджена молекула переходить в основний стан після випромінювання кванта світла:



де ν_2 – частота коливань випромінювання при флюоресценції в діапазоні довжини хвиль 200...400 нм. Інтенсивність випромінювання пропорційна концентрації діоксиду сірки.

Реєструють флюоресцентне випромінювання молекул діоксиду сірки за допомогою фотоелектронного помножувача (ФЕД) у спектральній області 260...370 нм, що виділяється повторним світлофільтром. Для зменшення впливу засвічування ФЕД збуджуючим випромінюванням, а отже, зменшення адитивної похибки реєстрація флюоресценції здійснюється під кутом 90° до напрямку збуджуючого випромінювання. Повну компенсацію фонового випромінювання ФЕД забезпечує циклічний режим роботи газоаналізатора. Періодично (через 30 с) підпалюють лампи ІСК 20-1. При відсутності підпалу реєструють тільки фоновий сигнал, який виникає за рахунок темнового струму ФЕД; під час підпалу реєструють фоновий сигнал ФЕД плюс сигнал флюоресценції. Різниця сигналів дає інформацію, вільну від похибки, яка може бути спричинена темновим струмом ФЕД.

Градуують газоаналізатор за допомогою вбудованого мікродозатора на основі термостатної ампули з рідким діоксидом сірки (градуваний газ) і атмосферного повітря, очищеного від діоксиду сірки за допомогою спеціального фільтра (нульовий газ).

Допоміжним, але необхідним, вузлом газоаналізатора є осушувач газової проби. Волога, що знаходиться в повітрі, спричиняє часткове гасіння флюоресценції, що зумовлює зниження чутливості приладу, а отже, збільшення основної приведеної похибки. Осушення газової суміші відбувається в дифузійному осушувачі.

Для забезпечення функціонування дифузійного осушувача і створення необхідної витрати проби, що проходить через реакційну камеру, в газових трактах блоку аналізу розрідження становить до 400 гПа. Постійне розрідження підтримують за допомогою регулювальника тиску.

Газоаналізатор 667ФФ вимірює масову концентрацію діоксиду сірки в діапазонах: 0...0,5; 0...1,5; 0...5,0 мг/м³ (допустима основна похибка приладу не перевищує ±20%).

Вимоги до експлуатації газоаналізатора й обробки результатів вимірювань викладені в “Методичних вказівках експлуатації автоматичних газоаналізаторів

діоксиду сірки на мережі Держкомгидромету РД 52.04-138-87”.

Газоаналізатор ГМК-3. Автоматичний оптико-акустичний газоаналізатор ГМК-3 (рис. 4.6) призначений для визначення в повітрі концентрації оксиду вуглецю.

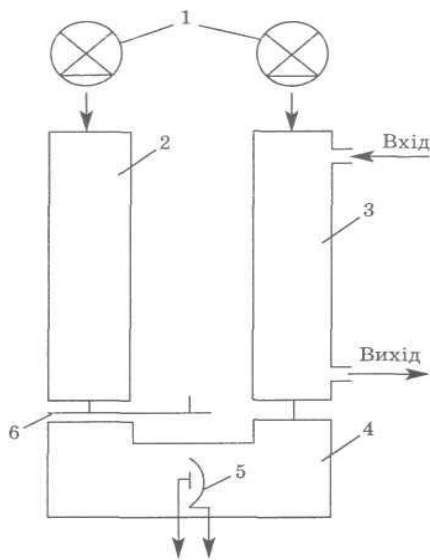


Рис. 4.6. Принципова схема оптико-акустичного газоаналізатора

1 – джерело випромінювання; 2 – порівнювальна кювета; 3 – кювета з газовою сумішшю, що аналізується; 4 – оптико-акустичний приймач; 5 – мікрофон; 6 – обтюратор.

Оптико-акустичний метод вимірювання оксиду вуглецю ґрунтується на фізичному принципі поглинання випромінювання інфрачервоного діапазону хвиль з центром смуги поглинання 4,7 мкм приймачем – замкнутою камерою, заповненою сумішшю оксиду вуглецю з аргонем. При поглинанні випромінювання оксиду вуглецю в приймачі виникають пульсації температури і тиску, які сприймаються мікрофоном і перетворюються на електричні сигнали. Пульсації тиску виникають внаслідок модуляції випромінювання механічним обтюратором. При цьому амплітуда коливань пропорційна вмісту оксиду вуглецю в газовій суміші, що аналізується.

Коефіцієнт поглинання є визначається за формулою:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot (P/P_0)^m \cdot (T_0/T)^n$$

де P і T – тиск і температура;

m , n – коефіцієнти, що залежать від умов вимірювання і газу, що аналізується;

T_0 , P_0 і ε_0 – температура, тиск і коефіцієнт поглинання за нормальних умов.

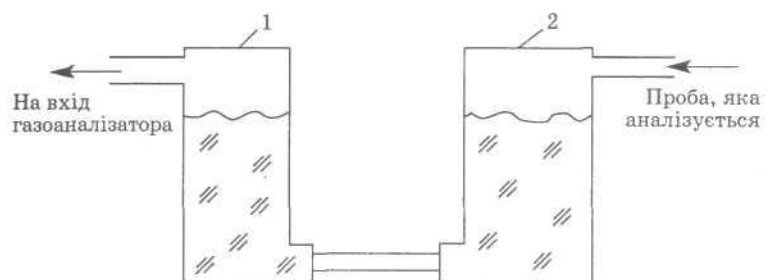
Оскільки коефіцієнт поглинання залежить від тиску і температури, то для зменшення ймовірності помилок, зумовлених впливом температури, внутрішній об'єм газоаналізатора термостатують. На результати вимірювань впливають також діоксид вуглецю (вуглекислий газ) і пари води, оскільки їх спектри поглинання перекривають спектри поглинання оксиду вуглецю. З газової суміші вологу видаляють за допомогою пристрою підготовки проб (рис. 4.7).

Перед початком вимірювань необхідно встановити системи осушування повітря, що досліджується, і виставити нульові значення; перевірити вплив пристроїв підготовки проб і каталізатора на покази газоаналізатора.

Рис. 4.7. Пристрій підготовки проб

1 – скляний резервуар ємністю

100...150 мл з ангідроном; 2 – скляний резервуар ємністю 200...300 мл (для дискретних проб) або 2000...3000 мл (для безперервної реєстрації) з силікагелем, насиченим хлористим кобальтом.



Для отримання нульової газової суміші замість продування азотом іноді

використовують фільтруючі коробки від спеціальних протигазів (типу “СО” або “М”), заповнені гопкалитом (гопкалитові патрони), які встановлюють між фільтрами 1 і 2 на період перевірки нульового значення. Підключають пристрої підготовки проб і гопкалитові патрони за допомогою поліхлорвінілової трубки (якомога коротшої).

Необхідною процедурою є перевірка герметичності газових систем. Для цього вихід системи, що перевіряється, закривають заглушкою, до входу підключають манометр і балон з азотом. У системі створюють тиск приблизно 29,4 кПа. Якщо протягом 30 хв. перепад тиску не перевищує 0,49 кПа, то система герметична, в іншому разі вона вважається не герметичною. За таких обставин необхідно знайти за допомогою мильного розчину місця витoku газу й усунути розгерметизацію стиків системи.

Для перевірки впливу пристроїв підготовки і каталізатора на покази газоаналізатора слід після прогрівання подати на його вхідний отвір нульову суміш і встановити на реєструючому приладі нульове значення; за наявності каталізатора перекрити порівняльну кювету, подати на вхід газоаналізатора контрольну суміш оксиду вуглецю (за ТУ 6-21-31-78) з балона і зняти покази $N_{1г}$ відтак відкрити порівняльну кювету і через 5 хв. зняти покази N_2 . Якщо різниця цих показів ($N_1 - N_2$) перевищує половину межі основної похибки газоаналізатора ($\pm 2 \text{ мг/м}^3$), слід провести регламентні роботи з каталізатором.

З метою контролювання впливу повітрязаборного тракту на покази газоаналізатора необхідно подати по чергову контрольну суміш з оксидом вуглецю з балона на вхід газоаналізатора і на вхід повітрязаборного тракту з пристроєм пробопідготовки. Якщо різниця показів перевищує половину межі допустимої основної приведеної похибки газоаналізатора, промивають газовий тракт, перевіряють герметизацію системи або вдаються до інших заходів щодо зниження різниці показів ($N_1 - N_2$).

Для визначення нестабільності напруги джерела живлення (220 В) протягом тижня по три рази на добу (всього 21 вимірювання) за допомогою вольтметра вимірюють рівень напруги в мережі. Якщо її зміни перевищують встановлені значення ($220 \pm 22/33 \text{ В}$), то необхідно встановити стабілізатор напруги.

Газоаналізатор ГМК-3 можна використовувати для аналізування дискретних (разових) проб повітря і для безперервної реєстрації рівня забруднення атмосферного повітря оксидом вуглецю (діапазон його вимірюваних концентрацій: $0 \dots 40 \text{ мг/м}^3 \pm 10\%$; $0 \dots 80 \text{ мг/м}^3 \pm 5\%$) в районі розташування лабораторії “ПОСТ”, за умови, що температура навколишнього середовища для датчика приладу становить $10 \dots 35^\circ\text{C}$, вміст вологи в аналізованому повітрі – 1 г/м^3 , вміст механічних домішок – 1 г/м^3 . Аналізують дискретні проби повітря у такій послідовності:

- 1) приєднання до робочої кювети пристрою пробопідготовки, перекриття (з метою зменшення об’єму проби) порівняльної кювети;
- 2) продування газоаналізатора азотом (з балона) або повітрям (через пристрій) з метою отримання нульової газової суміші;
- 3) встановлення за допомогою ручки “Встановлення нуля” стрілки реєструючого приладу на поділку $1 \dots 2 \text{ мг/м}^3$. Це значення приймають за нульове;
- 4) приєднання пробовідбірника з пробною, що аналізується (наприклад, з камерою, яка містить приблизно 1,5 л повітря, що аналізується);

5) пропущення аналізованої газової суміші протягом 3...4 хв. через газоаналізатор, проведення вимірювання;

6) від'єднання пробовідбірника, продування робочої кювети азотом (з балона) або повітрям, заздалегідь пропущеним через пристрій отримання нульової газової суміші;

7) підключення наступного пробовідбірника після повернення стрілки вимірювального приладу у вихідне нульове положення;

8) фіксування номера проби, місця (номер поста), дати і часу її відбору, концентрації оксиду вуглецю в пробі на діаграмній стрічці (праворуч від лінії вимірюваної концентрації);

9) розрахування концентрації домішки множенням ціни поділки шкали на кількість поділок. Результат за округлюють до десятих мг/м^3 і записують на стрічці самописця. Ціну поділки визначають за даними останнього калібрування приладу. Наприклад, при продуванні газоаналізатора перевірювальною газовою сумішшю концентрацією 37 мг/м^3 відхилення пера самописця становило 90 поділок. Звідси ціна поділки становить: $37: 90=0,41 \text{ мг/м}^3$.

Під час аналізу дискретних проб атмосферного повітря необхідно дотримуватися таких рекомендацій:

- вимикати збудник витрати при продуванні робочої кювети азотом;
- продувати порівняльну кювету азотом перед початком вимірювань (але не рідше одного разу на добу);
- якщо наступні вимірювання планується провести раніше ніж через 24 год., після аналізу проб повітря не вимикати прилад з мережі, оскільки час його нагрівання перед аналізом становить не менше 3 год.;
- замкнути вихід системи із входом пристрою пробопідготовки, а стрічкопротяжний механізм вимкнути, якщо прилад залишився увімкнутим.

За безперервної роботи газоаналізатора (найефективніший і найдодільніший режим) на його діаграмній стрічці записують назву газу, що вимірюється, вказують номер поста, його місцезнаходження, тип і заводський номер приладу, швидкість протягування стрічки, дату і час встановлення стрічки. Під час регламентних робіт на стрічці самописця роблять відмітки про їх початок і закінчення, записують дані перевірки і настройки нульового значення і чутливості, зауваження до роботи приладу. Ці дані дублюють у журналі спостережень, в який заносять також відомості про перелік виконаних при відвідуванні поста робіт.

Обробляють результати безперервної реєстрації концентрації оксиду вуглецю на стаціонарних постах у такій послідовності: проведення лінії нуля; розмітка часу; визначення концентрацій, усереднених за 20 хв.; визначення максимального значення концентрації; визначення часу існування концентрацій вище за 1,5 і 10 ГДК.

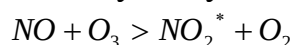
При проведенні лінії нуля з'єднують дві найближчі нульові помітки. Якщо лінія концентрації перетинається з лінією нуля, то покази, які лежать нижче лінії нуля, вибраковують. При обробленні стрічок потрібно відняти нульові значення. Якщо відмітки часу збігаються з відмітками на стрічці, кожний часовий інтервал буде відповідати відстані на стрічці в сантиметрах після розподілу добового запису на стрічці на 24 частини. Середні значення концентрації оксиду вуглецю (за 20 хв.) обчислюють як середнє арифметичне з п даних. Максимальне значення концентрації

оксиду вуглецю вибирають з 20-хвилинних інтервалів, записують на стрічці і підкреслюють червоним олівцем.

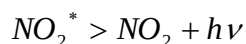
Усі значення концентрації відмічають на діаграмній стрічці з точністю до 1 мг/м³ у середині інтервалу, до якого вони належать. Визначають інтервал часу з концентрацією оксиду вуглецю, вищою ГДК, за піками, які перетинають лінію відповідного значення ГДК. Для цього до піків прикладається палетка з прозорої плівки. Час перевищення рівня ГДК визначають з точністю до 5 хв. Якщо таких випадків кілька, їх підсумовують за кожним п'ятихвилинним інтервалом (1,5 і 10 ГДК) за добу, дані записують на діаграмній стрічці. Палетку прикладають до діаграмної стрічки так, щоб вертикальні лінії 0, 1, 2, 3 збігалися з часовими поділками, а осьо́ва лі́нія поділяла площу під кривою на дві рівні частини.

Газоаналізатор 645-ХЛ. Автоматичний хемілюмінесцентний газоаналізатор 645-ХЛ всіх модифікацій призначений для інструментального контролю оксиду азоту NO, діоксиду азоту NO₂ і суми оксидів азоту NO_x.

Метод ґрунтується на вимірюванні кількості виділеного світла в хімічній реакції фотографічним методом. Використовують реакцію озону з оксидом азоту, внаслідок якої утворюється діоксид азоту в збудженому стані:



Необхідний для перебігу цієї реакції озон виникає в генераторі озону газоаналізатора внаслідок реакції кисню, очищеного від пилу, і вологи атмосферного повітря при високовольтному розряді. Із збудженого діоксид азоту переходить в основний стан з віддачею енергії інфрачервоного випромінювання, яке знаходиться в області спектра 620...2500 нм з максимумом при 1200 нм:



Приймачем випромінювання є фотоелектронний помножувач ФЕД. Інтенсивність випромінювання пропорційна кількості взаємодіючих молекул, тобто концентрації оксиду азоту.

Першим етапом визначення концентрації діоксиду азоту в суміші, що аналізують, є відновлення діоксиду азоту до оксиду азоту в спеціальному конверторі газоаналізатора на каталізаторі, нагрітому до 200°C. У цьому режимі роботи конвертора вимірюється випромінювання сумарної концентрації оксидів азоту (NO + NO₂). Потім концентрація діоксиду азоту визначається за різницею електричних сигналів:

$$(NO + NO_2) - NO = NO_2$$

Отже, газоаналізатор 645-ХЛ дає змогу трьома каналами вимірювати концентрації оксиду азоту, діоксиду азоту та суми оксиду і діоксиду азоту. З метою підвищення його чутливості в реакційній камері створюється оптимальне розрідження (600...800 гПа).

Газоаналізатори 645-ХЛ можуть працювати в складі автоматичних станцій контролю забруднення атмосферного повітря, в автономному режимі у лабораторіях типу "ПОСТ" та інших лабораторних приміщеннях. При виконанні вимірювань температура навколишнього середовища повинна бути 10...35°C. Різкі зміни температури, що зумовлюють конденсацію вологи, недопустимі. Для уникнення коливань напруги в мережі живлення необхідно встановити стабілізатор СИ-500М АЕЗ. 232.002 ТУ.

Установлення й експлуатація газоаналізатора 645-ХЛ повинні відбуватися

згідно з вимогами “Технічного опису й інструкції по експлуатації Ра 2.840.138 ТО” і методичних вказівок “Експлуатація автоматичних газоаналізаторів оксидів азоту на мережі Держкомгідромету РД 52.04-141 87”.

Обробляють стрічку газоаналізатора відповідно до загальних вимог.

Газоаналізатор 623НН. Автоматичний газоаналізатор 623НН призначений для забезпечення інструментального контролювання суми вуглеводнів. Його робота ґрунтується на полуменево-йонізаційному методі. Концентрацію вуглецю в повітрі визначають за зміною струму полуменево-йонізаційного детектора (ПД), який збільшується при введенні в полум'я водню органічних речовин. Високоомний вимірювальний перетворювач перетворює струм іонізації на вихідну напругу.

Газоаналізатор зроблений за двоканальною схемою: потік атмосферного повітря, що аналізується, ділиться на дві однакові частини. На один ПД, де реєструється загальна сума вуглеводнів, повітря надходить без змін. Інша частина потоку проходить через пристрій розділення вуглеводнів, де відбувається відокремлення метану від інших вуглеводнів. Другий ПД реєструє тільки метан. Значення концентрації суми вуглеводнів за вирахуванням метану є різницею електричних сигналів з обох датчиків.

Вимоги до експлуатації газоаналізатора й обробки результатів вимірювань викладені в методичних вказівках “Експлуатація автоматичних газоаналізаторів вуглеводнів на мережі Держкомгідромету. РД 52.04-139 – 87”.

Отже, методи відбору проб повітря, їх аналізу в хімічній лабораторії, без сумніву, важливі і необхідні для ефективного функціонування системи спостережень за забрудненням атмосферного повітря. Однак при отриманні інформації про стан забруднення атмосферного повітря цілодобово ефективніше застосовувати газоаналізатори, які вимірюють в автоматичному режимі концентрації певних забруднюючих речовин, фіксують їх максимальні й мінімальні значення, формують базу даних про місячне, квартальне, річне забруднення атмосферного повітря, що є основою для оцінювання і прогнозування стану приземного шару повітря.

Розділ 4

Оцінювання забруднення атмосферного повітря на основі даних лабораторних спостережень

4.1. Методи оцінювання забруднення атмосферного повітря

Головною метою аналізу забруднення повітря є отримання інформації про якісний та кількісний його склад, необхідної для прогнозування рівнів забруднення, оцінювання фактичного стану, реалізації заходів щодо охорони повітряного басейну.

Аналіз забруднення повітряного середовища є чи не найскладнішим завданням аналітичної хімії, оскільки повітря є рухомою системою, склад якої постійно змінюється, а одна проба може одночасно містити десятки, сотні органічних і неорганічних сполук. Крім того, концентрація токсичних речовин в атмосфері може бути мізерно малою (10^{-4} - $10^{-7}\%$ і нижче).

Для оцінювання забруднення повітря використовують лабораторні (характеризуються високою точністю і є незамінними для поглиблених досліджень); експресні (передбачають використання універсальних газоаналізаторів); автоматичні (забезпечують безперервний контроль забруднення атмосферного повітря) методи.

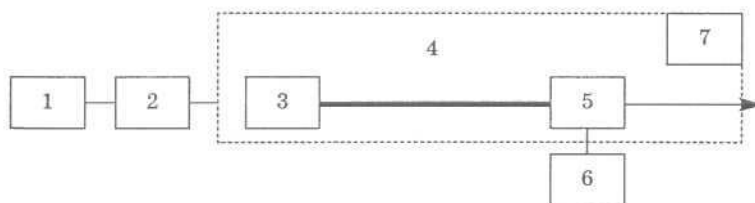
Лабораторні дослідження проводять з використанням хроматографічних, мас-спектрального, спектрального, електрохімічного методів аналізу забруднення атмосферного повітря.

Хроматографічні методи аналізу забруднення атмосферного повітря. Їх сутність полягає в розподілі, якісному виявленні та кількісному визначенні компонентів повітряної суміші за допомогою спеціальних пристроїв – хроматографів. Найефективніші вони за необхідності визначення складних домішок у повітряних пробах. Цю групу методів (залежно від мети визначення певних домішок) утворюють:

- газова хроматографія (метод дослідження мікродомішок летких органічних сполук). Реалізують його за допомогою газового хроматографа (рис. 5.1).

Рис. 5.1. Схема газового хроматографа

1 – газ-носіє (інертний газ), 2 – регулятор витрат, 3 – прилад для введення проби, 4 – колонка, 5 – детектор, 6 – самописець, 7 – термостат.



Розподіл летючих речовин у газовому хроматографі відбувається в певній послідовності. За допомогою невеликого скляного шприца (3) вводять пробу з одного кінця довгої вузької хроматографічної колонки (трубка довжиною 0,9...3,0 м і діаметром 0,25...50 мм), через яку йде газ-носіє, тобто інертний газ, який проходить через колонку з

постійною швидкістю і виносить компоненти проби, що з'являються на виході залежно від часу перебування їх в колонці. Розподіл компонентів газу відбувається за рахунок твердого або рідкого адсорбенту (нерухомої фази), який знаходиться в колонці. Завдяки абсорбції окремих компонентів на активних центрах адсорбенту або їх розчиненню в нерухомій фазі (залежно від фізичних властивостей компонентів суміші) одні з них просуваються швидше, а інші – повільніше, що дає змогу розрізняти їх на виході, використовуючи відповідний детектор. Внаслідок цього отримують хроматограму – зональний розподіл компонентів. На її основі виокремлюють та аналізують окремі речовини проби;

- рідинна хроматографія (метод, ефективний при аналізуванні проб повітря, забрудненого домішками токсичних органічних сполук (поліциклічних ароматичних вуглеводів, пестицидів та ін.) різних концентрацій). Принцип роботи установок рідинної хроматографії аналогічний газовим;
- йонно-рідинна хроматографія (метод визначення мікродомішок, здатних до вступу в реакції органічних і неорганічних сполук). Суть методу, принцип роботи установок тотожні двом попереднім;
- полуменево-йонізаційний метод (за його допомогою визначають сумарну кількість вуглеводнів). Детектування з його застосуванням здійснюють введенням газоподібної проби в полум'я водню, яке знаходиться між електродами з напругою в кілька сотень вольт. За відсутності домішок виникає дуже мала напруга йонізації ($10^{-12} \dots 10^{-13}$ А). Унаслідок потрапляння у водневе полум'я газоподібної домішки, яка містить вуглеводні, в полум'ї виникають йони, які прямують до додатного електрода. Напруга йонізації, яка виникає, ($10^{-7} \dots 10^{-12}$ А) посилюється електрометричним підсилювачем постійного струму і реєструється самопишучим приладом (рис. 5.2).

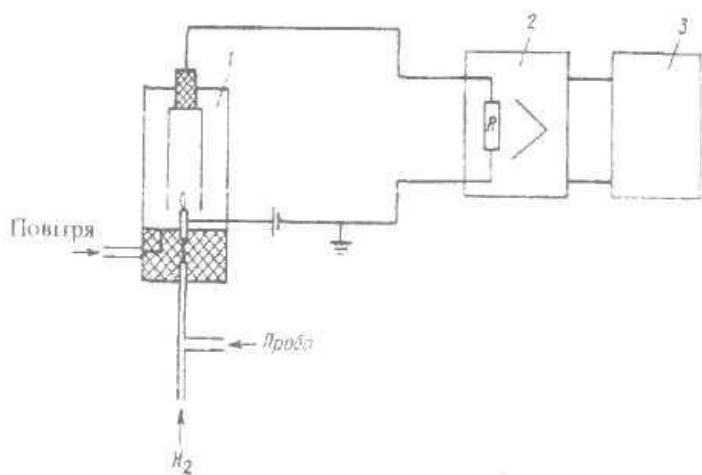


Рис. 5.2. Принципова схема включення полуменево-йонізаційного детектора

1 – полум'яно-йонізаційний детектор; 2 – підсилювач; 3 – самописний прилад; R – високоомний вимірювальний резистор

Використання полуменево-йонізаційного методу для детектування компонентів проби після їх розподілу з використанням газової хроматографії допомагає розрізняти наявні в пробах повітря вуглеводні і визначати їх кількість.

Завдяки полуменево-йонізаційному методу встановлюють тільки сумарну кількість наявних вуглеводнів, однак він не дає змоги розрізняти речовини.

Мас-спектральний метод аналізу забруднення атмосферного повітря. Послугуючись ним, здійснюють кількісний та якісний аналізи усіх сполук, які є в пробі. Цей метод полягає в йонізації газоподібної проби шляхом електронного бомбардування, після чого йони піддають дії магнітного поля. Залежно від маси і заряду йона відхилення проходить з різною швидкістю і за різними траєкторіями, що дає змогу визначити всі наявні сполуки та їх концентрації в пробі.

Спектральні методи аналізу забруднення атмосферного повітря. Ці методи найефективніші при дослідженні якісного і кількісного складу забруднення повітря. Їх сутність полягає у визначенні складу та будови речовини за її спектром, який впорядкований за довжиною хвилі електромагнітним випромінюванням. Спектральний аналіз дає змогу встановити елементний, нуклідний і молекулярний склад речовини, її будову (атомно-емісійний спектральний аналіз), визначити концентрації речовини за поглинанням шаром атомної пари елемента монохроматичного резонансного випромінювання (атомно-абсорбційний спектральний аналіз).

Одним з найдоступніших спектральних методів аналізу повітря є колориметрія, яка полягає у вимірюванні послаблення світлового потоку внаслідок вибіркового поглинання світла речовиною у видимій ділянці спектра. Інгрідієнт, що визначається, переводять у зафарбовану сполуку за допомогою специфічної хімічної реакції, потім визначають інтенсивність кольору розчину. Якщо речовина поглинає у видимій ділянці спектра, термін аналізу зменшується, оскільки зникає необхідність отримання зафарбованого розчину.

Активно використовуються і стрічкові фотоколориметричні газоаналізатори, в яких взаємодія речовини, що визначається, і реагенту відбувається на паперових, тканинних або полімерних стрічках. Стрічкові аналізатори, порівняно з рідинними, чутливіші, простіші в роботі, не вимагають часу на попереднє приготування розчину.

До спектральних методів відноситься також ультрафіолетова (УФ) та інфрачервона (ІЧ) спектроскопія. В УФ-ділянці найчастіше аналізують ароматичні сполуки, неорганічні речовини (SO_2 , NO_2 , Hg). Порівняно з колориметрією цей метод чутливіший, але недостатньо селективний, оскільки багато органічних з'єднань мають в УФ-ділянці спектра широкі смуги поглинання, які можуть перериватися. Це знижує точність вимірювань, а іноді унеможлиблює аналіз багатокомпонентних сумішей. Метод ІЧ-спектроскопії забезпечує ідентифікацію і кількісне визначення промислових забруднень органічного та неорганічного походження.

Особливо чутливим щодо визначення невеликих слідів органічних і неорганічних домішок у повітрі є люмінесцентний метод аналізу, який ґрунтується на принципі збудження молекул SO_2 , NO_2 , Cl_2 випромінюванням з довжиною хвилі, характерною для поглинання цих сполук у видимій та УФ-ділянках спектра. Збуджують флюоресценцію лазерами та високоінтенсивними газорозрядними лампами, а довжину хвилі вимірюють світлофільтрами.

З появою ядерних джерел випромінювання, наділених монохроматичністю, високою спектральною потужністю та напрямком випромінювання, поширилися активні методи зондування атмосфери у горизонтальному напрямку – до декількох десятків кілометрів у видимому, УФ- та ІЧ-діапазоні електромагнітного спектра.

Електрохімічні методи аналізу забруднення атмосферного повітря. Широко застосовують ці методи при систематичному контролюванні стану забруднення атмосферного повітря і повітря робочих зон, в лабораторіях АЕС та лабораторіях мережі спостережень Держкомгідромету України.

Найпоширеніші в аналізі атмосферних забруднень кондуктометричні та кулонометричні методи. Сутність кондуктометричного методу полягає у

вимірюванні електропровідності аналізованого розчину. Електропровідність розчину забезпечується йонами речовин, здатними дисоціювати в певних умовах, і залежить від концентрації йонів у розчині та їх рухомості. Кондуктометричний метод не вимагає використання складної апаратури, є високочутливим, швидкодіючим, виконується компактною апаратурою.

Кулонометрія є безеталонним електрохімічним методом порівняно високої точності та чутливості. Вона полягає у визначенні електричного заряду, необхідного для здійснення електрохімічного процесу виділення на електроді або створення в електроліті речовини, за якою аналізують досліджувану пробу.

Широкий спектр методів оцінювання забруднень атмосфери є запорукою того, що можна з високою точністю з'ясувати якісні та кількісні характеристики речовин і сумішей, наявних у повітрі.

4.2. Методи відбору проб атмосферного повітря для лабораторного аналізу

Одним з основних елементів аналізу якості атмосферного повітря є відбір проб.

Важливість його зумовлюється тим, що за неправильного відбору проб результати аналізу втрачають сенс. Проби повітря відбирають аспіраційним способом (пропускаючи повітря через поглинальний прилад з визначеною швидкістю) і способом заповнення посудин обмеженого об'єму. Для дослідження газоподібних домішок придатні обидва способи, а для дослідження аерозольних домішок і пилу – лише аспіраційний.

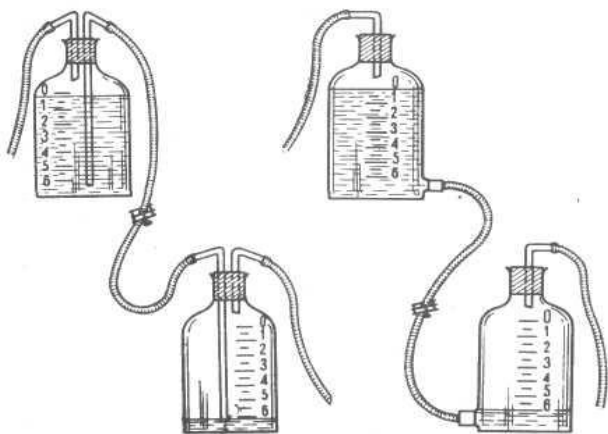
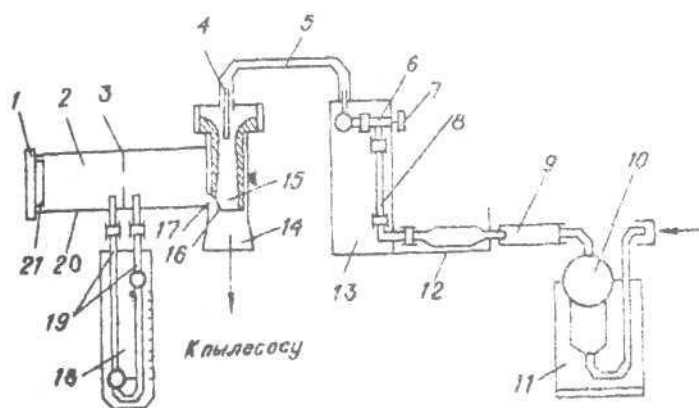


Рис. 5.3. Скляні аспіратори



Аспіраційний спосіб відбору проб повітря. Для аспірації повітря застосовують водяні аспіратори, повітродувки, насоси, електроаспіратори, вакуумні насоси, ежектори та інші прилади і пристрої, які пропускають повітря, а також прилади, які реєструють його об'єм (реометри, ротаметри та ін.).

Рис. 5.4. Пневматична схема аспілятора типу М-114

1 – фільтродержак; 2 – універсальний повітровідбірник; 3 – вимірювальна діафрагма; 4 – вхідний штуцер ежектора; 5 – трійник; 6 – регулювальний вентиль; 7 – регулювальний гвинт; 8 – ротаметр; 9 – захисний патрон; 10 – поглинальний прилад; 11 – штатив для поглиначів; 12 – штатив; 13 – блок реометрів; 14 – розтруб для кріплення ежектора; 15 – ежектор; 16 – регулятор витрати; 17 – отвір пилового каналу; 18 – реометр; 19 – штуцера для

кріплення реометра; 20 – корпус фільтродержака; 21 – розтруб для кріплення фільтродержака

Водяний аспіратор являє собою два герметичних сосуди однакової ємності, поставлених на різних рівнях і сполучених між собою сифоном. Якщо верхній посуд наповнити водою, то при стікання води в нижній посуд у верхньому створюється розрідження, внаслідок чого через спеціальний ввід затягується повітря. Водяні аспіратори можуть бути скляні і металеві (рис. 5.3). Максимальна швидкість протягування повітря, яку можна отримати звичайним аспіратором – 1,5...2 л/хв.

На практиці широко використовуються малогабаритні побутові пиłosмоки і спеціально сконструйовані для відбору проб повітря електроаспіратори (рис. 5.4).

Проби повітря можна відібрати також за допомогою ежектора, який приєднують до системи стисненого повітря або до балону із стисненим повітрям (рис. 5.5).

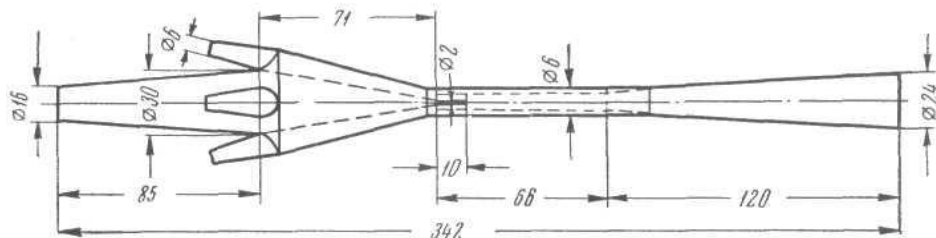


Рис. 5.5. Ежектор Рихтера

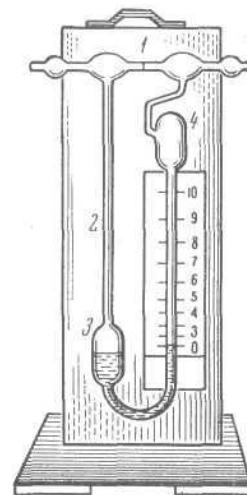
Для обрахунку об'єму повітря відібраного для аналізу пиłosосами і іншими електроаспіраторами, застосовують реометри (рис. 5.6).

В якості манометричної рідини використовують очищений гас густиною 0,82 або воду (при плюсовій температурі повітря).

При проходженні повітря через горизонтальну трубку реометра внаслідок наявної в ній діафрагми створюється опір руху повітря, причому отримується визначена різниця тиску до діафрагми і після неї. До діафрагми має місце підвищення тиску, після неї – розрідження. Тиск повітря передається на манометричну рідину, рівень якої піднімається на різну висоту в трубці. В залежності від діаметру отвору в діафрагмі швидкість проходження повітря коливається у визначених межах.

Рис. 5.6. Реометр

1 – скляна трубка, в яку впаяна перегородка с отвором посередині – діафрагма; 2 – манометрична трубка; 3, 4 – розширення



При одній і тій же діафрагмі висота манометричної рідини відповідає швидкості проходження повітря.

Для поглинання токсичних речовин з повітря використовують розчини, дрібнозернисті сорбенти з активною поверхнею – силікагель, активоване вугілля чи волокнисті і інші фільтруючі матеріали, які поміщають в різні поглинальні прилади (рис. 5.7).

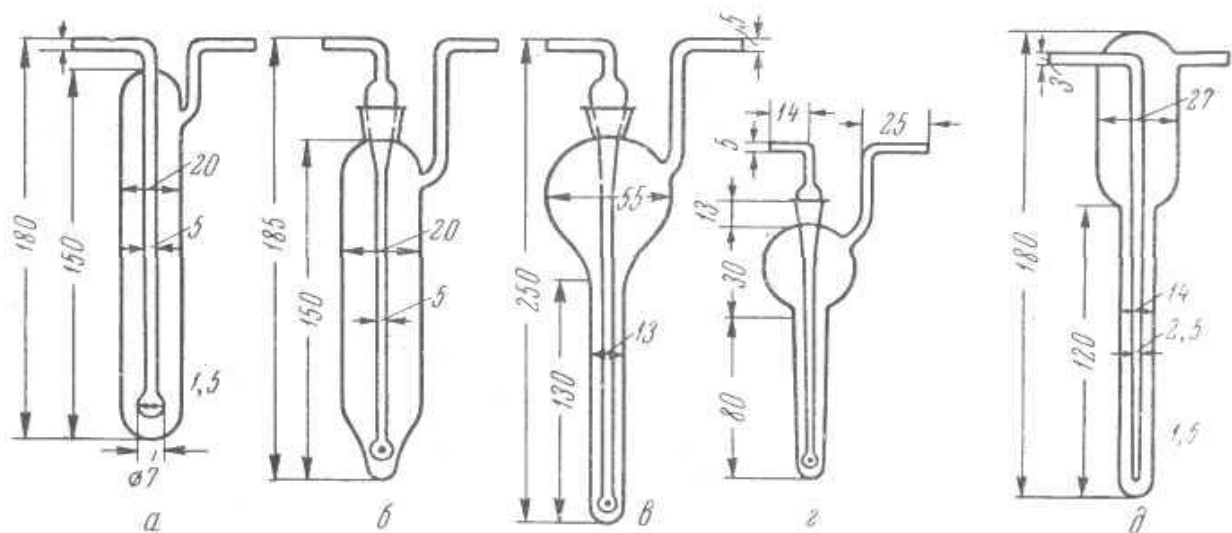


Рис. 5.7. Поглинальні прилади

а – поглинальний прилад Петрі; б – видозмінений поглинальний прилад Петрі; в – поглинальний прилад Полежаєва; г – мікропоглинальний прилад Полежаєва; д – поглинальний прилад Зайцева

Для ефективності поглинання необхідно забезпечити максимально можливе дотикання повітря з розчином. Досягають цього максимальним розпиленням поглинального розчину і здовженням шляху проходження повітря через розчин. У результаті пропускання повітря через поглинальний прилад відбувається концентрування аналізованої речовини в поглинальному середовищі.

Більш ефективними є поглинальні прилади зі скляною пористою пластинкою (рис. 5.8). Проходячи через пластинку, повітря у вигляді найдрібніших бульбашок поступає в поглинальний розчин і розпилює його, що обумовлює великий контакт повітря з розчином і більш ефективне поглинання.

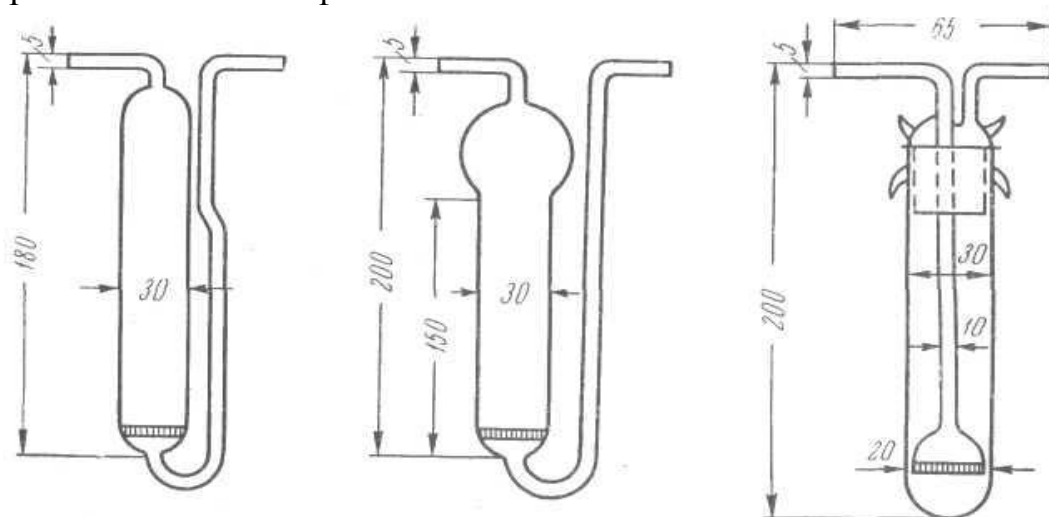


Рис. 5.8. Поглинальні прилади зі скляною пористою пластинкою

За принципом максимального розпилення сконструйований поглинальний прилад Гернет (рис. 5.9). Поглинальний розчин наливають через бокову трубку. Повітря поступає через нижню трубку в розпилювач і розпилює розчин всередині приладу. В верхній частині приладу знаходиться вловлювач бризків, заповнений скляними кульками для вловлювання крапель рідини, що виносяться повітрям. Прилад Рихтера являє собою циліндр з шароподібним розширенням в верхній частині (рис. 5.10). Всередині циліндру поміщена трубка, яка в трьох місцях

розширена, утворюючи напівшари. Поглинаючий розчин наливають в зовнішній циліндр. Повітря, проходячи через внутрішню трубку, змінює лінійну швидкість, розпилює поглинальну рідину, внаслідок чого відбувається великий контакт його з поглинальною речовиною.

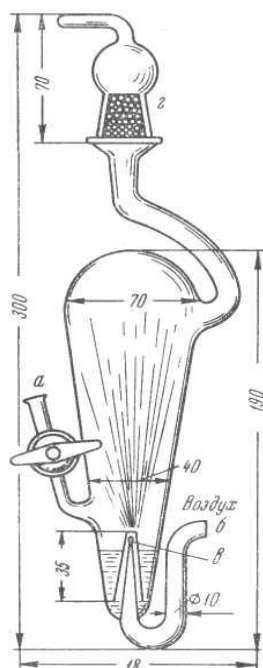
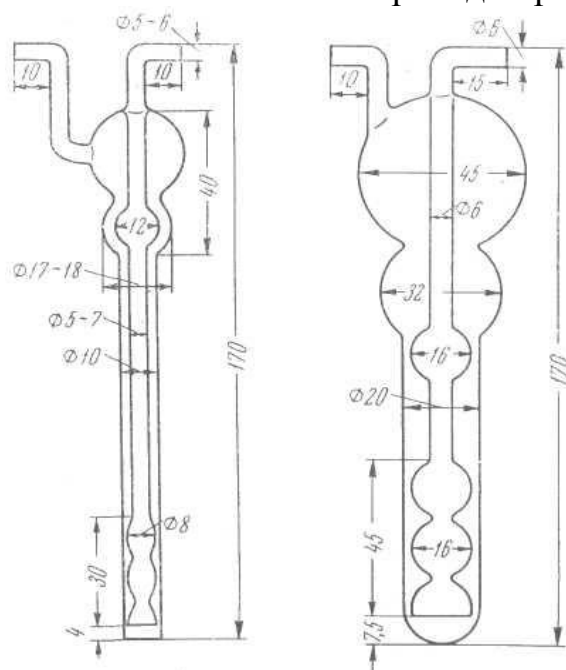


Рис. 5.9. Поглинальний прилад Горнет



Рас. 5.10. Поглинальні прилади Ріхтера

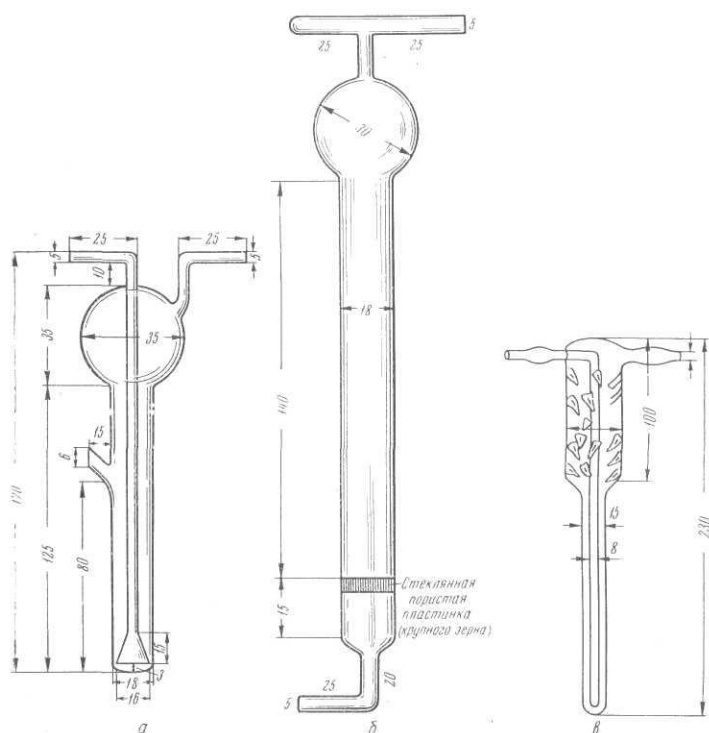
Відбір проб повітря на зернисті сорбенти проводять в нерухомому і “киплячому” шарі сорбенту. Рядом переваг володіє “киплячий” шар твердих сорбентів. Супроти “киплячого” шару невисокий, а контакт з речовиною, що аналізується, вищий. Це дозволяє відбирати проби повітря з високою швидкістю – 10...12 л/хв.

Для відбору проб повітря в “киплячий” шар застосовують поглинальні прилади Яворовської і видозмінений прилад Зайцева (рис. 5.11). В поглинальні прилади поміщають сорбент розміром зерен 0,25...0,5 або 0,5...1 мм. Струмінь повітря,

проходячи через шар сорбенту, зумовлює його енергійний рух, що забезпечує ефективне перемішування і поглинання.

Рис. 5.11. Поглинальні прилади для відбору проб в “киплячий” шар зернистих сорбентів

а, б – поглинаючі прилади Яворовської; в – видозмінений поглинаючий прилад Зайцева



Токсичні речовини, які поглинуті сорбентом, десорбуються термічним шляхом чи екстрагуються відповідними розчинниками.

Проби поділяють на разові (період відбору 20...30 хв.) та середньодобові (не менше 4-разових проб, через однакові проміжки часу протягом доби о 1, 7, 13 та 19 год.).

На стаціонарних пунктах (лабораторіях типу “ПОСТ”) системи відбору проб повітря забезпечують їх

разовий відбір для дослідження газових домішок, сажі, пилу та аерозолів. Система відбору проб повітря для аналізу газових домішок і сажі складається з повітропроводу, обладнаного нагрівальним пристроєм з терморегулятором, розподільного гребінця для підключення поглинальних приладів та двох електроаспіраторів. Система відбору проб повітря для дослідження пилу складається з трубки, яка обладнана фільтрами, та гнучкого шланга, який підключають до повітропроводу.

За нестационарних умов використовують аспірацію повітря за допомогою двигуна внутрішнього згоряння або пилососа, підключеного до стаціонарного джерела зі струмом (рис. 5.12).

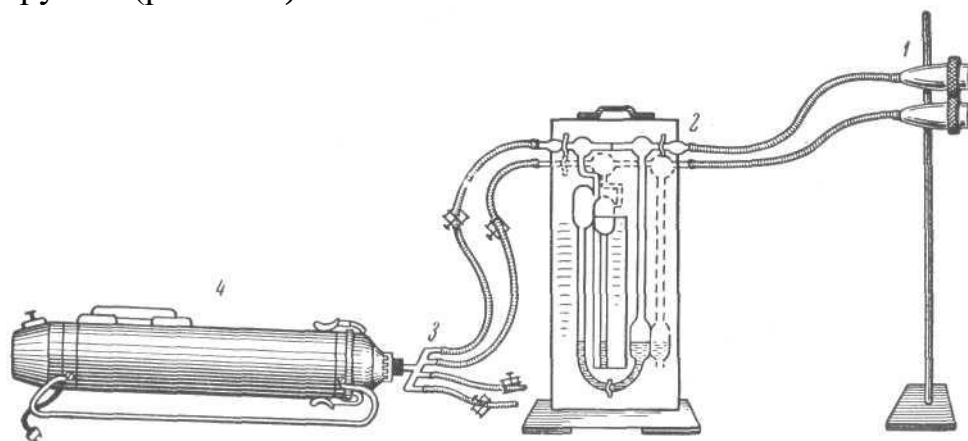


Рис. 5.12. Схема з’єднання приладів при відборі проб пилосмоком (електроаспіратором)

1 – патрон з фільтром; 2 – реометр; 3 – розгалужений перехідник; 4 – пилосмок

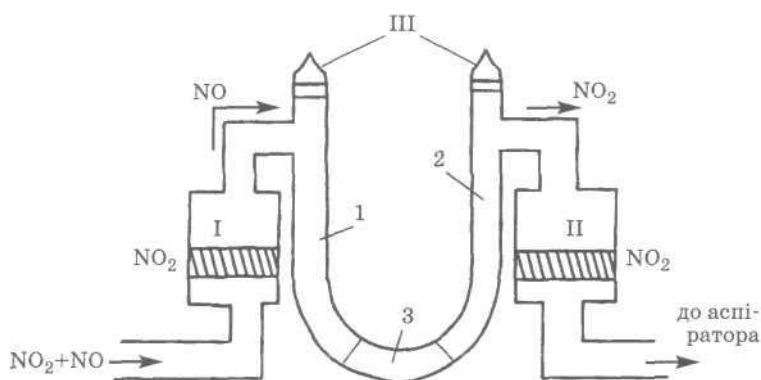
Відбір проб повітря способом заповнення посудин обмеженого об’єму. Використання цього способу зумовлено значною агресивністю хімічних речовин,

які вловлюють з повітря поглинальні пристрої. Звичайні скляні ємності найчастіше використовують при відборі проб повітря для визначення оксиду вуглецю та інших газових домішок. Склояний посуд заповнюють аналізованим повітрям шляхом продування через посудину його 10-кратного об'єму, після чого посудину закривають; за допомогою вакуумного заповнення (з герметично закритих посудин повітря відкачується, їх відкривають у місці відбору проби і потім знов закривають); способом заміщення попередньо залитої в посудину інертної рідини повітрям (після того, як рідина вилилась, посудину закривають).

При відборі разових проб повітря для визначення діоксиду сірки використовують прилад Ріхтера і сорбційну трубку; при відборі діоксиду азоту – U-подібну трубку і сорбційну трубку. Під час відбору проб необхідно уникати потрапляння світла на поглинальний прилад. Термін збереження проб, відібраних в U-подібну трубку, становить не більше 3 діб, а в сорбційні трубки – тиждень. За необхідності отримання інформації про наявність у повітрі окремо діоксиду і оксиду азоту між двома поглиначами (U-подібні або сорбційні трубки) встановлюють U-подібну трубку з окислювачем (рис. 5.13).

Рис. 5.13. U-подібна трубка

I, II – поглиначі NO_2 ; III – окислювач NO ; 1 – регулятор вологості; 2 – носій з окислювачем; 3 – скловата.



У поглинальний прилад надходить суміш $\text{NO}+\text{NO}_2$. Там NO_2 адсорбується, а NO надходить в U-подібну трубку, де за допомогою окислювача переходить в NO_2 . Регулятор вологості, який використовується в U-подібній трубці, забезпечує довгостроковість та ефективність

роботи окислювача, який у процесі роботи змінює колір від жовтого до зеленувато-коричневого, у зв'язку з чим його необхідно своєчасно замінювати.

Оксид вуглецю (CO) відбирають у газові піпетки або гумові камери. Через газову піпетку прокачують 10-кратний об'єм повітря, потім її щільно закривають. У гумові камери повітря відбирають кілька разів протягом 20 хв. Заповнена гумова камера герметизується затискачем.

Разові проби пилу відбирають на фільтруючі матеріали. Швидкість його руху в ротаметрі не повинна бути меншою від швидкості вітру в місці відбору проби. Залежно від швидкості вітру і швидкості відбору проби вибирають діаметр насадки.

Характеристики відбору проб основних забруднюючих речовин (період відбору 20 хв.) наведено в таблиці 5.1.

Відбір проб аерозолів проводять за допомогою фільтруючих пристроїв типу "Тайфун".

Певні особливості має методика відбору проб для визначення вмісту радіоактивних домішок. Проби доводять до необхідного об'єму і на у-спектрометрі визначають йод-131 (J^{131}) та інші летючі радіонукліди. Потім проби озонують (спалюють до золотоподібного стану) і визначають сумарну β -активність, після чого кожну добову пробу зберігають у спеціальних пакетах. Іноді комплектують пентадні

проби – проби, що містять 5 добових проб. Місячні проби формують зсипанням усіх добових проб в окремий пакет. їх супроводжують відповідною запискою, яка передбачає такі пункти: назва проби; назва пункту відбору; місяць, рік; дні, в які проби не відбиралися; кількість добових проб; об'єм повітря; загальна маса проби.

Таблиця 5.1

Характеристики пробовідбору основних забруднюючих речовин

Речовина, що контролюється	Поглиняльний прилад	Об'єм поглиняльного розчину, мл	Швидкість аспірації, л/хв
Діоксид сірки	Прилад Ріхтера Сорбційна трубка	6 0,1-0,2	4 0,5-2,0
Діоксид азоту	U-подібна трубка Сорбційна трубка	6 0,1-0,2	0,25 0,25
Пил (завислі речовини – спалюють до золоподібного стану)	Фільтр АФА-ХП-18 Фільтр ФПП-15		1-50 1-100

Охарактеризовані методи відбору проб дають змогу відібрати повітря для лабораторного аналізу за різноманітних умов. Вибір конкретного методу залежить від мети дослідження і якісного складу проби повітря. Правильний відбір проби впливає на достовірність лабораторних визначень концентрації забруднюючої речовини в повітрі.

4.3. Метеорологічні спостереження при відборі проб повітря

У зв'язку з тим, що метеорологічні чинники зумовлюють перенесення і розсіювання шкідливих речовин в атмосферному повітрі, відбір проб повітря повинен супроводжуватися спостереженнями за димовими факелами джерел викидів і такими метеорологічними параметрами, як швидкість і напрям вітру, температура і вологість повітря, атмосферні явища, стан погоди і підстилаючої поверхні. Результати спостережень записують у робочий журнал гідрометеоспостерігача, а оброблені результати – у книгу запису спостережень за забрудненням атмосферного повітря і метеорологічними елементами (КЗА-1).

Спостереження за димовим факелом і станом погоди, їх здійснюють, беручи під контроль найпотужніше джерело. При цьому фіксують колір і форму факела в місці виходу з джерела. Форму факела фіксують візуально і записують його шифр (1, 2, 3) відповідно до табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Шифр і характеристика факела

Шифр	Характеристика факела
1	Факел має нестійкі контури, клуби диму то високо піднімаються, то різко опускаються; спостерігається вдень при позитивному градієнті температури і помірній швидкості вітру
2	Факел піднімається вгору і рівномірно розтікається у всі сторони; частіше спостерігається в літній період; в денний час може спостерігатися при слабкій швидкості вітру
3	Г-подібна форма факела: дим при виході з труби прямує у горизонтальному напрямку або спочатку піднімається вертикально при нульовому або негативному градієнті температури і при штилі

Стан погоди оцінюють візуально за характерними ознаками, вказаними в табл. 5.3. У книгу КЗА-1 вносять відповідні записи і шифри.

Підстилаючи поверхню в радіусі до 100 м від місця спостереження визначають як суха запилена, суха не запилена, волога, мокра, зелена трава, пожовкла трава, сніг.

Таблиця 5.3

Характерні ознаки стану погоди

Сіруватий	Стан погоди, атмосферні явища	Характерні ознаки
0	Ясно	Немає хмар або окремі хмари закривають не більше 2/10 неба; сонце не закрите
1	Змінна хмарність	Хмари закривають менше 8/10 неба; сонце час від часу закривається хмарами
2	Імла	Помутніння повітря за рахунок зважених часток пилу, диму, гару. Повітря має синюватий відтінок
3	Серпанок	Слабке помутніння атмосфери за рахунок перенасичення повітря вологою. Повітря має сіруватий відтінок; горизонтальна видимість більша за 1 км
4 5	Дощ мряка	Опади у вигляді дрібних крапель; їх падіння на землю непомітне для ока
6	Пилова буря	Погіршення видимості на великій території через пил, піднятий сильним вітром
7	Сніг	Опади у вигляді крижаних кристалів
8	Туман	Помутніння атмосфери при горизонтальній видимості меншій 1 км
9	Похмуро	Небо вкрите хмарами на 8/10 і більше. Сонце не просвічує

Вимірювання швидкості і напрямку вітру. Повітряні маси в атмосфері весь час перебувають у русі, створюючи вітер – рух потоку повітря в горизонтальному напрямку. Виникає він унаслідок нерівномірного розподілу температури і тиску на земній поверхні. Вітер характеризується швидкістю і напрямком, які більшою або меншою мірою коливаються. Ці коливання називають поривчастістю вітру. При швидкостях 5...8 м/с вітер вважають помірним, понад 14 м/с – сильним; 20...30 м/с – штормом, понад 30 м/с – ураганом; різке короткочасне посилення вітру до 20 м/с – шквалом, повне безвітря – штилем.

Зміни швидкості й напрямку вітру фіксують за допомогою метеорологічної станції М-49 (в лабораторії типу “ПОСТ”), спеціальних метеорологічних приладів (вітромірів, анеометрів, флюгерів, вимпелів та ін.). Найпростіше метеорологічні параметри вимірювати на станції М-49, яка дає змогу визначати також температуру і вологість повітря (рис. 5.14).

Показчик метеорологічних параметрів є настільним приладом, на передній панелі якого розміщені: показчик відносної вологості і напрямку вітру, показчик швидкості вітру і температури; ручки управління (живлення (6 В, 220 В), швидкість вітру (ú), установка контролю напруги, напрямку вітру (φ), вологість (%), контроль (K) температури (ТВ і ТН)).

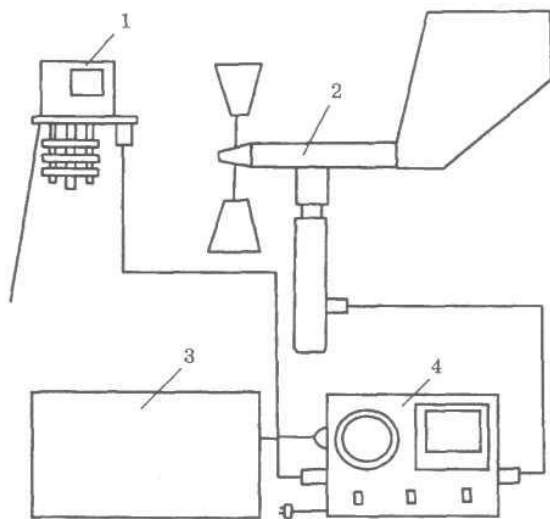


Рис. 5.14. Основні вузли станції М-49

1 – виносний датчик температури і вологості; 2 – датчики напрямку та швидкості вітру; 3 – блок живлення; 4 – показчик метеорологічних параметрів.

Швидкість (м/с) і напрямок (градуси, румби) вітру вимірюють на початку, в середині і наприкінці терміну спостережень. Щоразу реєструють по десять значень показників приладу через 10 с, затративши на кожний відлік параметра, що вимірюється, 100 с. Потім визначається середнє значення відліку (10 вимірювань кожного відліку підсумовують і ділять на 10). Після цього підсумовують

середні значення трьох відліків і ділять на 3. Отриманий показник засвідчує середню швидкість вітру і його середній напрямок у період проведення спостережень (тривалістю 20 хв).

За відсутності вітру в журналі спостережень у графі “напрямок” пишуть “штиль”, а “швидкість” – “0”.

Швидкість вітру вимірюють вітроміром або ручним анемометром. їх та інші метеорологічні і пробовідбірні прилади, пристрої закріплюють на тринозі на висоті 2 м від землі. Для визначення швидкості вітру анемометри включають на 10 хв. Початкові й кінцеві значення записують у журнал спостережень КЗА-1. Різницю відліків ділять на 600 і за графіком або таблицею, що додається до приладу, визначають швидкість вітру з точністю до 0,1 м/с (при використанні таблиць така точність досягається за допомогою методу інтерполяції). Напрямок вітру визначають протягом 2 хв по 16 румбах – напрямках до точок видимого горизонту.

Результати вимірювань, отримані за допомогою станції М-49, вносять в журнал КЗА-1 з точністю щодо швидкості вітру 0,5 м/с, а щодо напрямку – 1°.

Вимірювання вологості і температури повітря. Вологість повітря (вміст в повітрі водяної пари) є важливою характеристикою погоди і клімату. Її вимірюють гігрометрами і психрометрами, температуру – термометрами.

Вологість і температуру повітря визначають в лабораторіях типу “ПОСТ” з використанням метеостанції М-49. Для цього за 10 хв до початку спостережень датчики температури і вологості за допомогою висувної штанги виводять з павільйону “ПОСТ” на відстань 1,5 м (рукоятка штанги відводиться повністю). Для вимірювання температури перемикач переводять в положення “К” (контроль). За допомогою перемикача стрілка амперметра плавно встановлюється на праву крайню риску шкали, потім перемикач переводять в положення “ТН” або “ТВ” відповідно для плюсових або мінусових температур, що вимірюються, і записують показники верхньої шкали з точністю до 0,5°С.

Для вимірювання вологості перемикач переводять в положення “%” (вологість). За показниками внутрішньої шкали показчика записують дані з точністю до 1%.

Вимірювання вологості і температури в лабораторії типу “ПОСТ”, яка обладнана станцією М-49, проводять тричі наприкінці спостережень. Суму трьох

вимірювань ділять на три і вносять поправку на температуру, взяту з паспорту станції. Результати вимірювань записують в журнал спостережень КЗА-1.

За відсутності станції М-49 або несправності блоку температури і вологості можна використати аспіраційний психрометр. Перед проведенням вимірювань його горизонтально підвішують на триногу на висоті 1,5 м від землі подалі від будь-яких поверхонь (стіна, дерево, огорожа і т. п.). Підготовлений до спостережень психрометр потрібно винести з приміщення взимку за 30 хв, а влітку – за 15 хв до початку спостережень.

Вимірювання психрометром проводять протягом 20 хв тричі: на 10-й, на 12-й і на 14-й хвилини. За 4 хв до першого вимірювання вмикають вентилятор психрометра. Після першого вимірювання необхідно знову увімкнути вентилятор. Перед тим (взимку за 30 хв, влітку за 4 хв до початку спостережень) правий резервуар термометра, обгорнений батистом, змочують дистильованою водою. Для цього беруть гумову грушу з піпеткою, заздалегідь наповнену дистильованою водою, легким її стискуванням встановлюють рівень води в піпетці не вище ніж 1 см від її кінчика, і втримують його, закріпивши затискач на трубці між піпеткою і грушею. Після цього кінчик піпетки вводять повністю у внутрішню трубку захисту правого термометра і змочують батист у його резервуарі. Через деякий час знімають затискач і прибирають надлишки води з внутрішньої трубки. Після цього піпетку прибирають. До значень температури, які показані сухим (лівим) і змоченим (правим) термометрами, вносять поправки з доданого до кожного термометра перевірного свідоцтва, знаходять середні значення і записують в книгу спостережень. За показниками сухого термометра визначають температуру повітря. За даними психрометричних таблиць розраховують значення абсолютної і відносної вологості повітря. Для визначення відносної вологості повітря за показниками психрометра можна використати психрометричний графік, особливо якщо не потрібне значення абсолютної вологості. Під час спостережень узимку необхідно зважати на наявність на батисті переохолодженої води або льоду.

Для зміни батисту (не рідше одного разу на 10 діб) відкручують трубку захисту правого резервуара термометра, виймають металевий екран, знімають з резервуара термометра старий батист, обмивають резервуар термометра дистильованою водою. Змочують новий шматочок батисту і щільно, без складок, обгортають ним резервуар термометра, але так, щоб вище резервуара було 3...4 мм батисту, а подвійний його шар покривав не більше 1/4 поверхні резервуара. Батист прив'язують ниткою спочатку вгорі, а потім внизу. Знизу батист відрізають, щоб він спускався нижче резервуара термометра не більше ніж на 2...3 мм.

Вимірювання атмосферного тиску. Вимірюють атмосферний гідростатичний тиск (тиск, що діє на предмети, які знаходяться в атмосфері, та на земну поверхню) за допомогою барометра в паскалях (Па). За нормальний атмосферний тиск прийнято 1013,25 гПа (760 мм рт.ст.). Приземний атмосферний тиск змінюється у просторі та у часі. Особливо сильні зміни спостерігаються при виникненні антициклонів – розвитку і руйнуванні повільно рухомих областей високого тиску і циклонів – відносно величезних вихорів зі зниженим тиском, що швидко переміщуються. Сезонні і добові зміни атмосферного тиску пов'язані з добовими змінами температури.

Тиск атмосферного повітря на мережі спостережень і контролю забруднення

атмосферного повітря вимірюють за допомогою спеціального барометра моделі МД-49-А. Для уникнення помилок внаслідок тертя перед кожним відліком по шкалі необхідно вмикати вібратор на 5...10 хв; а внаслідок паралакса (видимої зміни положення предмета в результаті переміщення ока спостерігача) – відлік здійснювати в момент повного поєднання в одній площині показника стрілки і його відображення на дзеркальній поверхні до кільця шкали. Точність відліку становить до ± 270 гПа. У кожний вимір за барометром повинні бути введені додаткові (шкалова і температурна) поправки з паспорта приладу.

Дані про тиск на момент спостережень можна отримати також на найближчій метеостанції.

Послідовність основних операцій, рекомендованих при відборі разових проб повітря, наведена у табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Послідовність операцій при відборі разових проб повітря

Послідовність операцій	Час, що планується, і строки, хв.		
	До початку відбору проб, хв	Під час відбору проб, хв	Після відбору проб, хв
Встановити штатив з необхідними приладами (для метеорологічних спостережень і відбору проб повітря поза лабораторією типу “ПОСТ”)	За 30-15		
Витягнути штангу з приладами для визначення вологості і температури повітря за межі “ПОСТу”	За 10		
Оцінити стан погоди і дати характеристику факела	За 5–10		
Провести попереднє визначення швидкості і напрямку вітру	За 5		
Вибрати насадку до труби; встановити фільтри, інші поглинальні прилади	За 1–5		
Перевірити і ввімкнути пиłosоси, аспіратори	За 1		
Провести відбір проб повітря		1-20	
Виміряти температуру повітря перед аспіратором	За 1–2	На 10-й	Через 1–2
Провести вимірювання: швидкості і напрямку вітру вологості і температури по М-49 за психрометром тиску		На 1-2-й На 11-й На 18-й На 10-й На 12-й На 14-й На 18- 20-й На 5-й	
Вимкнути пиłosос і аспіратори. Вимкнути поглинальні прилади, герметизувати їх, перекласти в ящик для транспортування в хімлабораторію. Закрити штуцери гребінок заглушками. Прибрати всі прилади і підготуватися до спостережень в наступний термін. Оформити записи спостережень і заповнити книгу КЗА-1.			На 1-й На 5-й На 2-й На 5-40-й На 40-70-й

Результати спостережень записують в робочий журнал гідрометеоспостерігача, в якому повинні фіксуватися всі відхилення від нормативних й інструктивних вимог

(не вмикається підігрівання повітря в зимовий час, нестійка робота ротаметра (сильно тремтить поплавки) та ін.). Про несправності повідомляють керівництво, але до їх усунення записи ведуть при кожному спостереженні. У робочому журналі гідрометеоспостерігача перед кожним новим спостереженням роблять відмітки “відвезені” або “не відвезені” щодо поглинаючих приладів (в лабораторію для хімічного аналізу).

Записи в робочих журналах гідрометеоспостерігача дають змогу підвищити ефективність контролювання якості результатів спостережень стану атмосферного повітря через відбраковування сумнівних результатів з низки даних; сприяють підвищенню відповідальності служб експлуатації і ремонту обладнання, наявного на постах спостережень.

4.4. Оцінювання стану атмосферного повітря за результатами спостережень

Систематизація, опрацювання і узагальнення результатів спостережень дає змогу визначити статистичні характеристики забруднення атмосфери, за допомогою яких виявляють динамічні зміни в забрудненні атмосфери певною речовиною. До таких характеристик належать:

1. Середнє арифметичне значення концентрації домішки (забруднюючої речовини) ($\bar{C}$) – середньодобові, середньомісячні, середньорічні, середні багаторічні концентрації забруднюючих речовин (C_i), обчислені за сумарними даними стаціонарних, пересувних, підфакельних постів спостережень. Цей показник визначають за формулою:

$$(\bar{C}) = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n}, \text{мг/м}^3$$

де n – кількість разових концентрацій, які були визначені за відповідний період.

2. Середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань від середнього арифметичного: середньорічних концентрацій на постах від середньорічної і середньої багаторічної концентрації по місту; разових концентрацій від середньорічної концентрації по місту (району); середньорічних концентрацій для міста від середньорічної концентрації для групи міст; максимальних концентрацій домішки для міста за рік від середньої з максимальних концентрацій домішки за рік; разових (середньодобових) концентрацій від середньомісячної та середньорічної, середньомісячної – від середньорічної та середньої багаторічної; середньорічної – від середньої багаторічної:

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(C_i - \bar{C})^2}{n-1}}, \text{мг/м}^3$$

3. Коефіцієнт варіації вказує на ступінь змінності концентрації домішки (забруднюючої речовини) і обчислюється за формулою:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{C}}$$

де $\bar{C}$ – середня концентрація.

4. Максимальне значення концентрації домішки обчислюють, вибираючи

максимальну концентрацію (найбільше значення) домішки з разових, середньомісячних, середньодобових, середньорічних концентрацій з невеликої кількості спостережень, а також максимальну з разових концентрацій за даними під факельних спостережень та обчислюють середню з максимальних концентрацій за рік по групі міст за формулою:

$$\bar{C}_m = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L C_m$$

де L – кількість міст, що розглядаються.

5. Максимальну концентрацію домішки із заданою вірогідністю її перевищення визначають з припущення логарифмічно нормального розподілення концентрацій домішок в атмосфері для заданої вірогідності її перевищення:

$$C_m^P = \bar{C} \exp \frac{z \sqrt{\ln(1+V^2)}}{\sqrt{1+V^2}}$$

де $\bar{C}$ – середня концентрація; при $P=0,1\%$, $z=3,08$; $P=1\%$, $z=1,65$

6. Індеси забруднення атмосфери (ІЗА) кількісно характеризують рівень забруднення атмосфери окремою домішкою, що враховує різницю в швидкості зростання ступеня шкідливості речовин, приведенного до ступеня шкідливості діоксиду сірки, зі зростанням перевищення ГДК:

$$I_i = \left(\frac{C_i}{ГДК_i} \right)^{a_i}$$

де a_i – константа, що набуває значень 1,7; 1,3; 1,0; 0,9, відповідно, для 1, 2, 3 та 4-го класів небезпечності речовин і дає змогу привести ступінь шкідливості i -тої речовини до ступеня шкідливості діоксиду сірки.

7. Комплексний індекс забруднення атмосфери міста (КІЗА) є кількісною характеристикою рівня забрудненості атмосфери, що створюється я-речовинами, які присутні в атмосфері міста (чи району міста):

$$I_n = \sum_{i=1}^n I_i$$

де n – кількість домішок, що розглядаються (може включати всі забруднюючі речовини, що присутні в атмосфері міста, або тільки пріоритетні речовини, які визначають її стан). Його широко використовують для порівняння ступеня забруднення атмосфери в містах та регіонах.

Для оцінювання змін стану атмосферного повітря отримані середні концентрації забруднюючих речовин порівнюють з фоновими концентраціями.

Фонова концентрація – статистично вірогідна максимальна концентрація (C_ϕ , мг/м³), яка характеризує забруднення атмосфери.

її визначають як значення концентрації, перевищене не більше ніж у 5% випадків від загальної кількості спостережень. Фонова концентрація характеризує утворену всіма джерелами, розташованими на даній території, сумарну концентрацію. За відсутності необхідних даних спостережень фонтова концентрація може бути обчислена. Визначення C_ϕ для кожного поста спостережень здійснюють за даними, отриманими протягом періоду від 2 до 5 років. З метою підвищення вірогідності розрахунку C_ϕ необхідно вибрати такий період спостережень, протягом якого суттєво не змінювався характер забудови в районі поста спостережень, характеристики промислових викидів у радіусі 5 км від поста, розташування самого

поста, а відбір та аналіз проб здійснювалися за однаковими методиками. При цьому кількість спостережень повинна бути не меншою 200 на рік щодо кожної речовини, а загальна їх кількість за певний період – не менше 800.

Для визначення C_{ϕ} можуть бути використані дані стаціонарних і підфакельних постів спостережень. В результаті обробки даних для кожного поста з усіх результатів спостережень знаходять значення $C_{\phi i}$, де $i = 0; 1; 2; 3; 4$, які відповідають різним градаціям напрямку та швидкості вітру w (табл. 5.5).

Таблиця 5.5

Значення i в залежності від швидкості та напрямку вітру

а	Румби	Будь-який	Півн.	Схід	Півд.	Зах.
	Десятки градусів	Будь-які	32 - 4	5 - 13	14 - 22	23 - 31
	$w, \text{ м/с}$	0 - 2	3 - w^*			
	i	0	1	2	3	4

Верхню межу швидкості вітру w^* визначають за умовою, що швидкість вітру в підконтрольній місцевості $w > w^*$ переважає в 5% випадків. При визначенні її для коленої з 5 градацій швидкості та напрямку вітру значення концентрацій q_k (k – номер концентрації в i -тій градації) вписують в таблицю, після чого з'ясовують кількість спостережень в кожній градації n_i , яка при подальшій обробці повинна бути не менше 100. Якщо $n_i < 100$, то значення $C_{\phi i}$ вважається орієнтовним.

Дані підфакельних спостережень групують зони за критерієм відстані від джерела викидів. Кількість спостережень в кожній зоні повинна бути не менше 200. Дані для кожної з них поділяють на дві градації за швидкістю вітру. При швидкості вітру 0...2 м/с i становить 0; при швидкостях вітру від 3 до w^* м/с – від 1 до 4.

Віддають перевагу C_{ϕ} , отриманим за підфакельними вимірами для тих районів міста, де їхні значення більші ніж C_{ϕ} , розраховані за даними спостережень на стаціонарних постах.

Фонову концентрацію $C_{\phi i}$ можна визначити одним із статистичних розрахункових методів або графічно.

При оцінюванні величини різниць C_{ϕ} для п'яти градацій розраховують значення $\bar{C}$ і $\bar{C}$ – відповідно середнє за всіма градаціями та середнє за всіма градаціями значення фонові концентрації, крім $i = 0$:

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=0}^4 C_{\phi i} n_i}{\sum_{i=1}^4 n_i}$$

де $\sum_{i=0}^4 C_{\phi i} n_i$ – сума п'яти добутків $C_{\phi i}$ для кожної градації на кількість вимірювань у даній градації n_i ;

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^4 C_{\phi i} n_i}{\sum_{i=1}^4 n_i}$$

Якщо максимальне та мінімальне значення C_{ϕ} при $i = 0; 1; 2; 3; 4$ задовольняють нерівність:

$$|C_{\phi i} - \bar{C}| \leq 0,25 \cdot \bar{C} \quad (\text{а})$$

то для такого поста за C_ϕ приймають значення $\bar{C}$ незалежно від напрямку та швидкості вітру.

Якщо умови (а) не виконуються, але мінімальне і максимальне значення $C_{\phi i}$ при $i = 0; 1; 2; 3; 4$ задовольняють нерівність:

$$|C_{\phi i} - \bar{C}| \leq 0,25 \cdot \bar{C} \quad (б)$$

то для даного поста деталізація C_ϕ за напрямком вітру не виконується і за $C_{\phi i}$ в градації швидкості вітру $0 \dots 2$ м/с приймають значення $C_{\phi 0}$, а в градації швидкості вітру від 3 м/с до w^* – значення C .

Коли умови (а) та (б) не виконуються, C_ϕ представляють п'ятьма значеннями.

Для з'ясування шкідливої дії кількох забруднювачів визначають величину C_ϕ за цими речовинами. При цьому для кожного пункту спостережень та моменту часу концентрація n речовин приводиться до концентрації найпоширенішої з них.

Наприклад, при сумарній впливу SO_2 і NO_2 :

$$C_{SO_2+NO_2} = C_{SO_2} + C_{NO_2} ГДК_{м.р.}^{SO_2}$$

Отримані результати обробляють так само, як і щодо однієї речовини.

При проектуванні промислових підприємств і встановленні гранично допустимих викидів (ГДВ) дані про розподіл фонові концентрації по території населеного пункту представляють в табличній формі.

В окремих випадках можна обмежитись середнім значенням $\bar{C}_\phi$ по місту. Для цього розраховують середнє значення $\bar{C}_{\phi i}$ по місту для кожної градації швидкості і напрямку вітру. Для тих постів, де у градації, що розглядається, $\bar{C}_{\phi i}$ відрізняється від середнього по місту менш ніж на 25%, воно замінюється на середнє по місту значення $\bar{C}_{\phi i}$.

При встановленні ГДВ для реконструйованих або діючих підприємств, їх частка виключається із C_ϕ за формулою:

$$\text{при } C \geq C_\phi \quad C'_\phi = C_\phi \left(1 - \frac{0,4C}{C_\phi} \right)$$

$$\text{при } C < C_\phi \quad C'_\phi = 0,2 \cdot C_\phi$$

де C'_ϕ – фонові концентрація без урахування підприємства, що розглядається;

C – максимальна концентрація, яка створюється підприємством в точці розміщення поста.

За результатами спостережень і оцінювання стану атмосферного повітря визначають середні та максимальні концентрації забруднюючих речовин, а також фонові, які особливо важливі при прогностичних обчисленнях.

Розділ 5

Оцінювання забруднення атмосферного повітря на основі спостережень за біологічними об'єктами

5.1. Біоіндикація атмосферного повітря

Сучасні закордонні і вітчизняні дослідники пропонують оцінювати рівні забруднення на основі спостережень за біологічними об'єктами, які можуть бути індикаторами забруднень навколишнього середовища. Такий метод отримав назву “біоіндикація”.

Системи моніторингу, побудовані на основі дослідження поведінки рослин і тварин, дають змогу оцінити біологічні ефекти від впливу забруднення повітря, їх просторовий розподіл, можливе нагромадження на значних територіях.

У деяких видів рослин і тварин змінюються особливості розвитку (швидкість росту, процес цвітіння, утворення плодів, інтенсивність забарвлення та ін.) У відповідь на різні подразнюючі фактори. Ці властивості людство помітило уже давно і використовувало для практичних потреб. У зв'язку з загальною екологізацією різних наукових напрямів, людського мислення загалом методи біоіндикації усе частіше використовують сучасні науковці, зокрема і в моніторингу навколишнього середовища.

Моніторинг біологічних ефектів під впливом різних забруднювачів довкілля використовують у локальному, регіональному та національному масштабах.

Біоіндикація – оперативний моніторинг навколишнього середовища на основі спостережень за станом і поведінкою біологічних об'єктів (рослин, тварин та ін.).

Цей метод дедалі поширюється, оскільки має такі переваги:

- вимірювання сумарного ефекту зовнішнього впливу;
- вивчення впливу забруднення на рослини і тварин;
- визначення впливу у просторі й часі;
- можливість застосовувати профілактичні засоби.

Користуючись інструментальними методами дослідження, можна визначити характеристики повітря, води і ґрунту, але лише на момент відбору проб. Однак лишайники, наприклад, здатні накопичувати радіоактивні елементи, мікроелементи, вміст радіонуклідів у них може бути у 10 разів вищий, ніж у трав'янистих рослинах. Лишайники нагромаджують газоподібні й тверді речовини з атмосфери практично постійно і необмежено. Тому, відстежуючи процеси їх накопичення (відсутності), можна оцінити рівень забруднення середовища. Наприклад, біоіндикатором водного середовища може бути фітопланктон. Його надмірний розвиток спричиняє евтрофікацію водоймищ – підвищення рівня первинної продукції, зумовлене збільшенням концентрації біогенних елементів, азоту та фосфору, що призводить до загибелі риби внаслідок накопичення надмірної кількості азоту і фосфору, які різко прискорюють розвиток рослин.

У дніпровській воді виявлені черепашки, які раніше існували тільки у лиманних водоймах Чорноморського узбережжя, що свідчить про різке підвищення за останні

роки вмісту солей у Дніпрі. Локальними індикаторами прісних ґрунтових вод у західних лиманах та сухих руслах північного і західного Казахстану є угруповання мезофільних злаків (мезофіти – рослини, які проростають при середньому зволоженні, помірно теплому режимі і достатній забезпеченості мінеральним живленням); постійними індикаторами засолених ґрунтів в західній Туркменії слугують галофіти (солестійкі).

Під впливом забруднень довкілля змінюються еколого-фізіологічні ознаки: пігментація, забарвлення рослин, їх спричиняє надлишок токсичних солей у ґрунті або нестача поживних речовин. Наприклад, галофіти при помірному підвищенні засолення мають насичений зелений колір; за значної кількості солей у ґрунті – сіро-синюватий; при засоленні за умов недостатнього зволоження – оранжево-червоний.

Виокремлюють статичні і динамічні індикаційні ознаки. Наприклад, присутність певного індикатора (рослини), його форма – це статичні ознаки, а швидкість росту або інші зміни, що відбуваються в часі, належать до динамічних. Рослинність може бути використана не лише як індикатор окремих факторів середовища, а також як показник сумарних умов: типів ґрунту чи клімату, гірських порід, сільськогосподарських угідь. Біоіндикаторами можуть бути не лише ті рослини, які помітно реагують на аномалії. Зовнішні подразники впливають на кислотність середовища, щільність коріння.

Значення індикатора в екологічних дослідженнях визначають дві величини: екологічна спряженість індикатора (V) і зустріч індикатора на обсязі індикації (F). Загальну значущість індикатора можна виразити у вигляді індексу V/F (у відсотках).

Біоіндикація має певні переваги як метод отримання безпосередньої інформації про зміни стану біоти в конкретних умовах забруднення, але він повинен поєднуватись з хімічними й геофізичними дослідженнями для отримання не лише якісних, а й кількісних відомостей.

5.2. Забруднюючі речовини і їх суміші, які впливають на рослинний покрив

Рослинний покрив як важлива складова біосфери відображає її загальний стан і перебіг майже усіх процесів, що відбуваються на планеті. Життя на Землі було б неможливе без безперервного процесу фотосинтезу, що відбувається в зелених частинах рослин, які є основним стабілізатором вуглекисло-кисневого балансу повітряного басейну. Рослини як важливий компонент біогеоценозу помітно впливають на інші його елементи, сприяють формуванню ґрунтового покриву, впливають на хімізм ґрунту і його родючість, а також на життя усіх тварин і живих організмів, одночасно реагуючи на всі зовнішні фактори.

Забруднюючі речовини і їх суміші, які впливають на рослинний покрив. Рослини чутливо реагують на зовнішні умови. За достатньо високих концентрацій забруднювачів у багатьох з них ушкоджується листя, а зі зростанням кількості забруднюючого фактора протягом короткого проміжку часу можливе значне ураження рослини. Внаслідок некрозу (загибелі тканини) її колір змінюється від металево-сірого до коричневого, а в процесі старіння вона може втратити колір або вигоріти. Хронічне ушкодження рослин виникає і внаслідок дії невеликих

концентрацій певних речовин протягом тривалого часу. До ознак хронічного ушкодження належать бронзове зафарбування листя, хлороз (знебарвлення), їхнє передчасне старіння. Відомо, що живі організми і рослини здатні поглинати певні забруднюючі речовини в особливо великих кількостях, тобто в них процеси накопичення або концентрування відбуваються інтенсивніше, ніж у навколишньому середовищі. Такі забруднювачі рослин вважають основними, однак флора накопичує другорядні забруднювачі і суміші речовин.

Основні забруднюючі речовини, на які реагують рослини: озон (O_3), оксиди азоту, діоксид сірки, фториди (табл. 6.1).

Озон (O_3) – газоподібна забруднююча речовина, яка утворюється внаслідок складної реакції між окислами азоту за участю сонячного світла. Озон потрапляє в рослину через листя внаслідок звичайного газообміну між рослиною і навколишнім середовищем. Найчутливіше до дії озону листя, яке формується, але найпомітніше він уражає старі листки рослини. Загальною ознакою ураження рослин озоном є плямистість, яка вказує на його гостру дію. Ознаки ушкоджень рослин озоном різні й залежать від виду та сорту рослини, концентрації озону, часу дії світла, а також від багатьох інших факторів.

Таблиця 6.1

Основні та другорядні забруднюючі атмосферу речовини і їх суміші, що впливають на рослинний покрив

Забруднюючі речовини	Джерела викидів	Токсична для рослин концентрація, млн ¹ г
1. Основні фотохімічні оксиданти:		
озон	Двигуни внутрішнього згорання	0,04-0,7
нітрати	Двигуни внутрішнього згорання	0,004-0,01
оксиди азоту	Печі, двигуни внутрішнього згорання	0,21-100
оксиди сірки	Печі (вугілля або нафта), інші промислові процеси	0,1-0,5
фториди	Виробництво алюмінію, фосфатів, цегли та ін.	0,001
2. Другорядні:		
аміак	Втрати при виробничих процесах	
бор		
хлор	Двигуни внутрішнього згорання	
етилен та пропилен	Різні виробничі процеси	0,0005-10
хлористий водень і соляна кислота	Печі, різні виробничі процеси	
тверді частки і важкі метали	Печі	
сірчаноокислий натрій		
3. Суміші забруднюючих речовин		
озон і діоксид сірки		
діоксид сірки і діоксид азоту	Всі вказані вище джерела	

Специфічна ознака гострої дії озону на рослину – поява цяточок, які з часом зливаються й утворюють плями на поверхні листка. Цяточки можуть бути білими, чорними, червоними або червонувато-пурпуровими (табл. 6.2). За низьких концентрацій O_3 листя набуває червоно-бурого або бронзового кольору, що, як правило, призводить до хлорозу, старіння та опадання листя. Хлороз може бути

єдиною ознакою хронічного впливу озону протягом тривалого часу.

Таблиця 6.2

Види рослин, які пошкоджуються озоном, і типові ознаки пошкоджень

Рослини	Типові ознаки
Ясен Сосна Квасоля)	Білі краплинки, пурпурова бронзовість Кінці голок жовтувато-коричневого кольору, плямистість голок Бронзовість, хлороз
Огірки Виноград Цибуля Картопля Шпинат Тютюн Кавун	Білі цяточки Цяточки від червоно-коричневого до чорного кольору Білі плями, обезбарвлені кінчики Сірі, металевого відтінку плями Сіро-білі плями Біло-сірі плями Сірі, металевого відтінку плями

Оксиди азоту (NO_x) – газоподібні забруднюючі токсичні сполуки NO , NO_2 , N_2O . У забрудненому повітрі вміст оксидів азоту зумовлює утворення озону. Однак у багатьох випадках концентрація оксидів азоту надто мала, щоб помітно ушкодити рослину. Низькі концентрації NO_2 стимулюють ріст рослин, листя набуває темного кольору. Проте у деяких випадках виникає неспецифічний хлороз із наступним ушкодженням та опаданням листя. Англійські вчені виявили, що оксиди азоту є основною речовиною, яка забруднює повітря в теплицях, які обігрівують вуглеводневим паливом. Гостра дія NO_2 може бути схожа з гострою дією на рослини SO_2 .

Діоксид сірки (SO_2) – забруднююча речовина, яку викидають у повітря теплові електростанції (особливо ті, що працюють на вугіллі) і деякі промислові підприємства, її концентрація в повітрі висока поблизу джерел викидів і поступово знижується із збільшенням відстані від нього. За природних умов можливе поєднання гострої та хронічної дії SO_2 .

SO_2 , потрапляючи на листя, окислюється до високотоксичної сполуки SO_3 , а потім повільно перетворюється на сульфат SO_4 , менш токсичний. При низьких концентраціях SO_2 у повітрі SO_3 практично повністю окислюється до сульфату, і рослини не страждають. За високої концентрації SO_2 на SO_3 перетворюється швидше, ніж SO_3 на SO_4 , внаслідок чого відбувається гостре ушкодження – листя широколистяних рослин знебарвлюється, між жилками (з'являється бурий або білий колір) або на краях деяких листків спостерігається ефект “ялинок”. Ознакою хронічної дії SO_2 є хлороз, або знебарвлення листя із зміною їх кольору до червоно-бурого; у хвойних рослин – почервоніння голок зверху вниз. Рослини страждають за наявності концентрації SO_2 0,05...0,50 млн^{-1} при дії протягом 8 год і більше.

Фториди перебувають у атмосфері у вигляді газу, твердої домішки або газоподібного фториду, адсорбованого іншою твердою речовиною. Фтористий водень (HF) у вигляді газу токсичніший, ніж у твердому стані. Він присутній у викидах стаціонарних джерел забруднення – плавильних заводів і заводів, які використовують алюміній. Рослинність поблизу джерел викидів страждає найбільше.

Хронічна дія HF викликає у рослин хлороз уздовж прожилок листя, гостра дія HF некроз країв листя, який починається з верхньої частини листка і поширюється

до його основи, внаслідок чого листя може деформуватися або скручуватися. Однодольною рослиною, яку використовують як індикатор, є гладіолус. У них колір листя змінюється від білого до бурого, починаючи з верхівки листка до основи. Чітка темно-бура смуга відокремлює мертву тканину рослини від живої. У хвойних рослин з'являються голки з "обпаленими" краями або "обпалені" повністю.

Особливістю фториду є його здатність накопичуватись в листі, особливо на краях і верхівках. Для оцінки ступеня ушкодження рослин HF застосовують аналіз тканини листка.

Другорядні забруднюючі речовини, які діють на рослини: аміак, бор, хлор, етилен, пропилен, хлористий водень, соляна кислота.

Аміак (NH_3) надходить в атмосферу в результаті аварій на виробництві. Він особливо вражає рослини поблизу місця аварії. Як і у разі дії NO_x рослини ушкоджуються тільки за високої концентрації аміаку. Найчутливіше до дії NH_3 листя середнього віку, яке може змінити колір із тьмяно-зеленого до бурого або чорного. Дія низьких концентрацій NH_3 зумовлює появу на нижній стороні листка глянцевої або сріблястості.

Бор (В) – речовина сірувато-чорного кольору. Її дія на рослини, які ростуть поблизу джерел викидів, зумовлює некроз на краях листя та між жилками, а також плямистість. Листя набуває чашоподібної форми, деформується, особливо старе. Гострі ушкодження можливі на відстані до 200 м від джерела. Найчутливішими до дії бору є горіх сірий, клен, шовковиця, дикий виноград, а стійкі – в'яз, бузок, груша і більшість трав'янистої рослинності.

Хлор (Cl) застосовують як окислювач. У зоні розливу хлору внаслідок аварій при транспортуванні рослини особливо ушкоджуються. На краях листка з'являються плями від темно-зеленого до чорного кольору, які потім знебарвлюються до білого або стають бурими. Ознаки ушкодження листя між жилками подібні до ознак спричинених дією SO_2 . Можлива також поява цяточок, що нагадує результат впливу озону. У хвойних, як і при дії озону, може виникати некроз кінчиків голок і плямистість. Чутливі до дії хлору гірчиця і соняшник.

Етилен (C_2H_4) – природний рослинний гормон, який утворюється при ушкодженні рослин різними забруднювачами повітря. Він позначається на процесах цвітіння, дозрівання плодів, старіння та опадання. Етилен також присутній у вихлопних газах автотранспорту і є забруднюючою речовиною.

До ознак ушкоджень рослин етиленом належать погіршення їх росту, передчасне старіння та опадання листя, погіршення цвітіння, передчасне розкриття бруньок, повільне розпускання листків, їх скручування.

Пропилен (C_3H_6) – ненасичений ациклічний вуглеводень, безбарвний газ. Вплив пропілену на рослини подібний до дії етилену, але його спричинюють вищі концентрації. Пропилен пригнічує цвітіння у хризантем, уповільнює вертикальний ріст, але стимулює появу листя. Рослини, уражені пропиленом, мають менше за розміром, але товстіше листя.

Хлористий водень (HCl , безколірний димучий в повітрі газ з різким запахом) та соляна кислота (розчин хлористого водню у воді, безбарвна «паруюча» в повітрі рідина) надходять в атмосферу з локальних джерел.

Типовою реакцією на дію хлористого водню є міжжилковий та краєвий хлороз, після чого настає некроз, який проявляється в зміні кольору від жовтого, бурого,

червоного до чорного. Межі некротизованих ділянок можуть бути від білого до кремового кольору.

Ознаками ушкодження рослин аерозолем соляної кислоти вважають появу цяточок від червоно-коричневого до чорного кольору, а соляною кислотою – листову плямистість, причому плями облямовуються смугою білого або кремового кольору.

У рослинах хлориди, як і фториди, часто акумулюються у верхівках листків. Аналіз ушкодженого листа дає змогу встановити рівень вмісту в них хлоридів.

Тверді частинки (пил) та важкі метали. Вони проникають крізь листя або пошкоджені клітини епідермісу. Дрібні частинки можуть осідати на листках, знижуючи світлопоглинання і відповідно фотосинтез, негативно впливати на запилення квітки, розміри і стан листя.

Важкі метали з атмосфери, осідаючи на рослину або земну поверхню, мають тенденцію накопичуватись, особливо у верхніх шарах ґрунту, звідки можуть потрапити у рослину. Концентрація важких металів у ґрунті залежить від вмісту в ньому глини та органічної речовини.

Найпоширенішим металом, що може потрапляти у рослину і ґрунт, є свинець. Він накопичується в ґрунті, але чітких доказів відносно того, що він уражає рослину, немає. Цинк, кадмій, мідь у середині літа спричиняють міжжилковий хлороз із наступним почервонінням листя дерев, які ростуть поблизу джерела.

Ртуть – єдиний важкий метал, який перебуває в рідкому стані за нормальної температури. Вона вражає майже всі рослини. Особливо чутливою до ртуті є троянда, на листі якої з'являються бурі плями, воно жовкне, а потім опадає.

Молоді бутони буріють і опадають. Визначення вмісту важких металів в рослинах можливе за допомогою методу атомно-адсорбційної спектрофотометрії.

Сульфат натрію трапляється поблизу целюлозно-паперових комбінатів. Дія Na_2SO_4 зумовлює уповільнений ріст і некроз листя у квасолі, зменшення висоти кущів помідорів, які вирощують у теплицях.

Суміші забруднюючих речовин. У повітрі, яке оточує рослини за звичайних умов, міститься кілька потенційних фітотоксичних забруднювачів. Суміші забруднюючих речовин можуть спричинити ті самі ушкодження рослин, що й окремі забруднювачі, а суміш газів може змінювати порогову чутливість рослин.

Суміш озону і діоксиду сірки. Ознаки ушкоджень нею схожі з ознаками ураження O_3 або SO_2 залежно від їх концентрацій. Якщо концентрації O_3 і SO_2 нижчі від порогової для SO_2 , але дорівнюють або нижчі від порогової для O_3 , то спостерігаються ознаки ушкоджень, схожі на отримані внаслідок дії O_3 . Вплив суміші позначається на люцерні, капусті, цибулі, квасолі.

Діоксид сірки і діоксид азоту. Дія цих речовин в суміші з концентраціями нижча від порогових значень для кожного газу, вона проявляється в ушкодженні верхньої сторони листка редьки, помідорів, соєвих бобів.

Отже, забруднення довкілля хімічними сполуками призводить до часткової деградації рослинного покриву, знижуючи його біомасу та природоохоронні функції.

5.3. Рослини-індикатори і рослини-монітори

За особливостями реакції на вплив забруднювачів рослини поділяють на рослини-індикатори й рослини-монітори.

Рослина-індикатор – рослина, у якої ознаки ушкодження виявляються при впливі фітотоксичної концентрації забруднюючих речовин або їх суміші.

Рослина-індикатор є хімічним сенсором, який може виявити в повітрі присутність забруднюючої речовини, але спостереження за нею не дають змоги отримати дані про її кількість.

Індикаторами можуть бути такі рослини, які акумулюють у тканинах забруднюючу речовину або продукти метаболізму, утворені внаслідок взаємодії рослини із зовнішніми чинниками: важкими металами (свинець і кадмій), газоподібними речовинами, такими як фтористий водень (HF) або сульфат (SO_4). Внаслідок їх дії у рослин можуть змінюватись параметри розвитку: швидкість і якість росту і дозрівання, цвітіння, утворення плодів і насіння, процесів розмноження; знижуватись продуктивність і врожайність. Кожний параметр окремо або їх комплекс можна використати, щоб визначити наявність забруднюючих речовин у повітрі і (за допомогою проведення дослідів) у контрольованих умовах для того, щоб зіставити ознаки ушкодження або зміни у стані рослини з наявністю певної забруднюючої речовини або їх суміші. Такі дослідження засвідчили, наприклад, що тютюн дуже чутливий до дії озону і реагує характерними ушкодженнями. Також виявлено, що кількість зав'язі і врожайність помідорів значно зменшуються при хронічному впливі на цю рослину озону у низьких концентраціях. У соєвих бобів за дії певних доз SO_2 з'являються небажані ознаки, змінюються швидкість росту і врожайність.

Лишайники і мохи відомі як накопичувачі забруднюючих речовин, переважно важких металів, які ці рослини можуть акумулювати у кількостях, що значно перевищують їх концентрацію в навколишньому середовищі.

Отже, поява у рослин типової ознаки ушкодження вказує на наявність у повітрі забруднюючої речовини або їх суміші.

Зважаючи на важливість кількісної оцінки, особливо інформативними є організми, які у певний спосіб реагують саме на кількість забруднювача у довкіллі, тобто рослини-монітори.

Рослина-монітор – рослина, за ознаками ушкодження на якій можна отримати інформацію про кількість забруднюючих речовин або їх суміші у довкіллі.

Звичайно, з цією метою використовують різноманітні прилади. Однак прилади коштують дуже дорого, для їх роботи необхідні живлення, калібрування, спостереження за функціонуванням. Іноді вони надто чутливі і непридатні для роботи в умовах суворого клімату. На відміну від них рослини дешеві, легко відновлюються, швидко розмножуються і по-різному реагують на вплив, даючи змогу вибрати одну або кілька найхарактерніших реакцій для певного дослідження. Можна також використати недовговічні (трав'яні) рослини, які оновлюються кожного сезону чи кілька разів протягом одного вегетаційного періоду, або дерев'яні рослини (дерева, кущі), котрі можна висадити на потрібних ділянках і використовувати як індикатори протягом довгого періоду.

Для того щоб індикатор став монітором, тобто міг інформувати про якісні і кількісні характеристики забруднювача, необхідно визначити і використати

залежності між реакцією рослин на забруднення і концентрацією цієї речовини в навколишньому середовищі. Для цього використовують три основні способи:

- зіставлення ступеня ушкодження, спричиненого забруднюючою речовиною, із відомою концентрацією забруднюючої речовини у довкіллі;
- використання рослини як живого колектора (накопичувача забруднюючих речовин);
- вимірювання кількості забруднюючої речовини або метаболітів (новоутворених речовин), які з'явилися в рослинних тканинах після дії забруднювача, і зіставлення отриманих значень з концентрацією забруднюючої речовини в повітрі.

Оскільки внаслідок притаманної рослинам змінності види і сорти рослин порізному реагують на вплив негативних факторів, слід відбирати ті рослини, реакція яких передбачувана. Такими є мохи, папороті, голо- і покритонасінневі, які використовують як біоіндикатори і (або) біомонітори.

Отже, моніторинг природних популяцій можна поєднувати із розведенням та селекцією з метою отримання чутливих до впливу забруднюючих речовин рослин з передбачуваними реакціями. Можливе виведення нових видів рослин, придатних для моніторингу забруднення повітря.

При проведенні дослідів з метою моніторингу довкілля вивчають ознаки ушкодження рослин, зміни їх в рості та розмноженні, зниження врожайності або продуктивності, а також зміни ареалів поширення різних видів. Однак такі реакції також значною мірою залежать від віку рослини, факторів довкілля та способів обробітку ґрунту. Тип ґрунту, вміст в ньому мінеральних речовин, відносна вологість, топографічні та метеорологічні умови впливають на тип реакції рослини, на дію певної концентрації або дози будь-якої забруднюючої речовини або їх суміші. У зв'язку із змінністю рослин навіть на території певної популяції при здійсненні моніторингу необхідно використовувати багато різних рослин і розмішувати їх у такий спосіб, щоб вони підлягали максимальному впливу вітрів.

Оцінювання реакції рослин на забруднення. У польових умовах необхідний ретельний відбір рослин для встановлення залежності “доза – відповідна реакція”. Якщо рослина реагує на вплив ушкодженням листків, зміною темпів росту, врожайності, слід експериментально з'ясувати, як вона реагує на різні дози однієї і тієї самої речовини або суміші.

Ушкодження листя можна аналізувати за допомогою серії фотознімків методом прямих порівнянь знімків ураженого листя з контрольними знітками листя рослин, які зазнали впливу відомих концентрацій забруднюючих речовин в лабораторних умовах. Поділ досліджуваної ділянки з великою кількістю рослин на квадрати дає змогу виразити кількісно дані про пошкодження листя, з'ясувавши кількість їх ушкоджень; ступінь ушкодження; чисельність ушкоджень на одиницю поверхні. За допомогою лінійних графіків можна відобразити залежності ушкодження листя від періоду дії та дози забруднюючої речовини. Ці криві можна порівняти з кривими “доза – відповідна реакція”, отриманими в лабораторних умовах. У такий спосіб можна визначити якісний склад повітря протягом певного періоду і встановити вид забруднюючої речовини або склад суміші.

Певний метод кількісної оцінки обирають залежно від рослинного матеріалу, забруднюючої речовини та вимірюваних параметрів, які потребують дослідження.

Ступінь ушкодження листя трав'янистих рослин з'ясовують візуально, визначаючи площу (у відсотках) ушкодженої поверхні листя. У разі спостереження за хвойними рослинами оцінюють довжину голок, їх колір і форму, вік хвої, кількість ушкоджених голок на гілці (у відсотках).

Результати спостережень можна об'єднати в дві групи: площа ушкодженої листової поверхні (у відсотках); площа нових ушкоджень кожної рослини за визначений період часу.

Якщо рівень забруднення визначається за обсягом поглинання забруднюючої речовини, з'ясовують кількість забруднюючої речовини або кількість метаболітів, спричинених забруднювачем. Вміст сульфату в тканинах слід зіставити з концентрацією SO_2 в навколишньому середовищі, фтору – із концентрацією HF . Для порівняння результатів різних досліджень необхідна стандартизація методів збирання та оброблення рослинного матеріалу і приладів, які використовуються.

Рослини-колектори молекул успішно використовувати для моніторингу важких металів. Наприклад, мох здатний поглинати такі важкі метали, як цинк, свинець, кадмій, нікель, мідь та магній. Метали не тільки накопичуються в листі лишайників, а й поглинаються їх тілом та акумулюються в тканинах. Висушивши, зваживши і здійснивши хімічний аналіз тканини зібраних рослин, можна визначити кількість поглинутого металу. Змінюючи проміжки часу між зборами рослин, можна зіставити вміст металу в їх тканинах із концентрацією металу в повітрі.

Лишайники можна використовувати для контролю вмісту SO_2 в навколишньому середовищі. Здатність до акумуляції SO_2 залежить від виду цих рослин. Поєднання методів інструментального моніторингу із спостереженнями за лишайниками дасть змогу встановити залежність між їх ростом і концентрацією SO_2 в довкіллі. Швидкість росту і колір лишайника вказують на присутність або відсутність SO_2 і його приблизну концентрацію в повітряних масах. Цей метод використовують при моніторингу SO_2 в Англії, Ірландії, Канаді, Франції, Швеції та США.

Відбір і підготовка біологічних матеріалів для біомоніторингу. Отримання достовірних, повних і точних даних за допомогою біоіндикації можливе лише у разі точного дотримання низки вимог. Так, при виборі рослини для використання її в ролі біомонітора необхідно дотримуватися таких умов:

- наявність у рослини вираженої реакції на вплив забруднюючої речовини, тобто помітних ознак ушкодження, змін швидкості росту, морфологічних змін, порушень цвітіння, змін продуктивності або врожайності;
- відбір рослин, невибагливих до умов вирощування і догляду;
- відбір рослин, які мало піддаються впливу шкідників та хвороб.

Отримання усереднених зразків матеріалів рослинного походження (сформованих з 5-6 разових проб) є складним завданням, що потребує правильного обрання місця, способу і часу. Рослинні зразки слід збирати на достатньо великій відстані від будівель, доріг і джерел забруднюючих речовин. Досліджувану ділянку умовно розділяють на кілька квадратів, з кожного рівномірно відбирають рослинний матеріал (листя, стебла, кору) в необхідній кількості. Пробу рослин (цілі чи окремі частини) збирають у першій половині дня за сухої погоди. На ранніх стадіях розвитку (2-3 листки) у ній має бути не менше 10 рослин з одного гектара; для гречки, гороху, зернових – 25-30; у високорослих рослин беруть нижні, добре

розвинуті листки (не менше 50 рослин). Проба повинна бути репрезентативною, тобто забезпечувати відповідність її хімічного складу хімічному складові аналізованого матеріалу (наприклад, кількість рослинного матеріалу квітів – 300 г, подрібненого листя і трави – 200 г, трави – 400...600 г, кори і коренів – 600...650 г).

Паралельно з відбором проб проводять біологічний облік відібраних рослин (висота рослин, кількість пагонів на одній рослині, фази розвитку).

Аналізи рослинних зразків проводять відразу, або зберігають їх у холодильнику.

Призначений для аналізу рослинний матеріал передусім очищують від піску, землі та інших механічних домішок. Після цього листки, плоди і насіння обов'язково просушують до повітряно-сухого стану (крім випадків, коли необхідно зробити аналіз рослинного зразка у сирому вигляді), пробу гомогенізують (подрібнюють). Сирі рослинні матеріали подрібнюють у міксері або іншому гомогенізаторі, використовуючи чистий скляний посуд і зроблене з нержавіючої сталі дробильне обладнання. Інтенсивної вентиляції зразка при гомогенізації треба уникати, бо це може призвести до втрат деяких компонентів, особливо тих, які легко окислюються.

Сухі і висушені продукти (зерно, насіння) подрібнюють спеціальними млинками, іноді просівають ситом із визначеними розмірами отворів, щоб отримати потрібну зернистість. Зразки біологічного походження перед аналізом, зазвичай, мінералізують сухим (спалювання органічної речовини за вільного доступу повітря, в результаті чого залишаються мінеральні елементи перевалено у вигляді оксидів металів) або вологим (озолювання органічної речовини розчинами кислот, внаслідок чого утворюється розчин з мінеральними речовинами) методами. Щоб при сухій мінералізації (озоленні) не втратити летючі компоненти, рослинний зразок нагрівають до температури не вище 450°C. Оскільки при цьому у більшості випадків не вдається повністю позбутися органічних компонентів, до золи додають концентровану азотну кислоту і випарюють насухо. Для позбавлення від решток вуглецю використовують метод випарювання із соляною кислотою на піщаній бані. Елементи мінерального залишку визначають за допомогою певних хімічних реакцій.

У деяких випадках застосовують метод мінералізації зразка вологим способом за допомогою таких речовин, як азотна кислота, азотна кислота і соляна кислота з добавкою перекису водню, сірчана кислота і соляна кислота. У досліджувану пробу доливають суміші кислот, залишають на певний період до обуглення рослинної маси. Після цього розчин підігрівують на слабкому вогні 5..7 хв до утворення однорідної коричнево-бурої маси, температуру озолення підвищують і продовжують його. Повне озолення триває 15...20 хв. Після його закінчення розчин охолоджують, розбавляють дистильованою водою і визначають потрібні елементи, застосовуючи характерні для того чи іншого елемента хімічні реакції.

Отже, головною умовою достовірності результатів біомоніторингу є правильне відбирання рослинної проби, її підготовка до аналізу та проведення самого аналізу.

Частина II

ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ ВІД ВИКИДІВ ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ ТА ПАРИ

**Розділ 6. МЕТОДИ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВІД
ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ**

**Розділ 7. МЕТОДИ І ПРИНЦИПИ РОЗРАХУНКУ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ
ВЛОВЛЕННЯ І ЗНЕШКОДЖЕННЯ ШКІДЛИВИХ ДОМІШОК У
ПОВІТРІ**

Розділ 8. ЗАСОБИ І ПРИСТРОЇ ОЧИСТКИ ПРОМИСЛОВИХ ГАЗІВ

**Розділ 9. ОЧИСТКА ПРОМИСЛОВИХ ГАЗІВ ВІД ДІОКСИДУ СУЛЬФУРУ І
ОКСИДІВ НІТРОГЕНУ**

**Розділ 10. ОЧИСТКА ПРОМИСЛОВИХ ГАЗІВ ВІД ОКСИДУ КАРБОНУ,
ДІОКСИДУ КАРБОНУ І СІРКОВОДНЮ**

**Розділ 11. МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ВІД
ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ**

Розділ 6

Методи захисту атмосферного повітря від шкідливих викидів

6.1. Основні напрямки захисту атмосфери від шкідливих домішок

Промислове виробництво і інші види господарської діяльності людини супроводжуються виділенням в повітря приміщень і в атмосферне повітря різних речовин, що забруднюють повітряне середовище. Багато технологічних процесів на підприємствах металургійної, хімічної, нафтохімічної промисловості, у ряді цехів машинобудівних заводів, на багатьох інших виробництвах супроводжуються надходженням шкідливих газів і пари в атмосферне повітря. Активним забруднювачем атмосферного повітря є транспорт, в першу чергу, автомобільний.

Для того, щоб уникнути важких наслідків забруднення атмосфери і підтримувати якість повітря на рівні, відповідному санітарним вимогам, викиди в атмосферу повинні очищатися від аерозольних забруднень, шкідливих газів і пари. Викиди шкідливих речовин в атмосферу можна значно зменшити завдяки здійсненню технологічних заходів.

В міру розвитку техніки і вдосконалення технологічних процесів з'являються нові види речовин, що викидаються в атмосферу. В той же час відбувається модернізація існуючих і розробка нових видів технологічного обладнання. Запроваджуються безвідходні технології, при яких виключаються викиди в атмосферу, з'являються нові методи очищення повітря від шкідливих газів і пари, розробляється і застосовується нове технологічне обладнання, до складу якого входять вбудовані агрегати для видалення і знешкодження шкідливих речовин.

Всі відомі методи і засоби захисту атмосфери від хімічних домішок можна об'єднати в три групи.

До першої групи входять заходи, направлені на зниження потужності викидів, тобто зменшення кількості речовини, що викидається, в одиницю часу. До другої групи входять заходи, направлені на захист атмосфери шляхом обробки і нейтралізації шкідливих викидів спеціальними системами очищення. До третьої групи входять заходи щодо нормування викидів як на окремих підприємствах і пристроях, так і в регіоні в цілому.

Для зниження потужності викидів хімічних домішок в атмосферу найширше використовують:

- заміну менш екологічних видів палива екологічними;
- спалювання палива за спеціальною технологією;
- створення замкнутих виробничих циклів.

У першому випадку застосовують паливо з нижчим балом забруднення атмосфери. При спалюванні різних палив такі показники, як зольність, кількість діоксиду сірки і оксидів азоту у викидах, можуть сильно відрізнятися між собою, тому введений сумарний показник забруднення атмосфери в балах, який відображає ступінь шкідливої дії на людину. Так, для сланців він рівний 3,16, вугілля – 2,02, природного газу – 0,04.

Спалювання палива за особливою технологією (рис. 6.1) здійснюється або в киплячому шарі, або попередньою їх газифікацією.

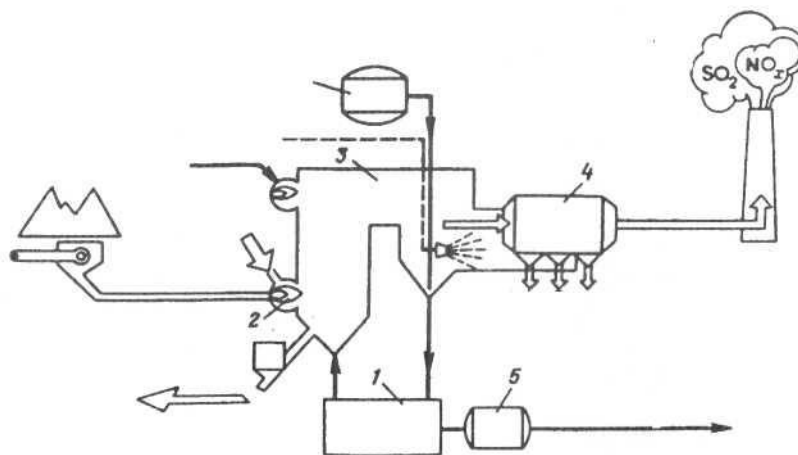


Рис. 6.1. Схема теплової електростанції з використанням допалювання топкових газів і вприскування сорбенту:

1 – парова турбіна; 2 – пальник; 3 – бойлер; 4 – електроосаджувач; 5 – генератор

Для зменшення потужності викиду сірки тверде, порошкоподібне або рідке паливо спалюють в киплячому шарі, який формується з твердих частинок золи, піску або інших речовин (інертних або реакційно-здатних). Тверді частинки вдуваються в гази, що проходять, де вони завихрюються, інтенсивно перемішуються і утворюють примусово рівноважний потік, який в цілому володіє властивостями рідини.

Попередній газифікації піддаються вугілля і нафтові палива, проте на практиці найчастіше застосовують газифікацію вугілля. Оскільки в енергетичних установках газ, що надходить і виходить, може бути ефективно очищений, то концентрації діоксиду сірки і твердих частинок в їх викидах будуть мінімальними.

Одним з перспективних способів захисту атмосфери від хімічних домішок є впровадження замкнутих виробничих процесів, які зводять до мінімуму відходи, що викидаються в атмосферу, повторно використовуючи і споживаючи їх, тобто перетворюючи їх на нові продукти.

Заходи, які направлені на захист атмосфери шляхом обробки і нейтралізації шкідливих викидів спеціальними системами очищення, передбачають очистку газів джерела викиду. Промислова очистка газів від зважених у них твердих або рідких частинок проводиться для зменшення забруднення повітря, вловлювання із газу цінних продуктів чи видалення з нього шкідливих домішок, які негативно впливають на послідовну обробку газу, а також руйнують апаратуру.

За агрегатним станом забруднювачі повітря поділяються на пил, тумани і газопароподібні домішки. Системи очищення повітря, залежно від вмісту у ньому шкідливих речовин, діляться на три групи: системи і методи очищення викидів від пилу, туманів, газопароподібних домішок (рис. 6.2).

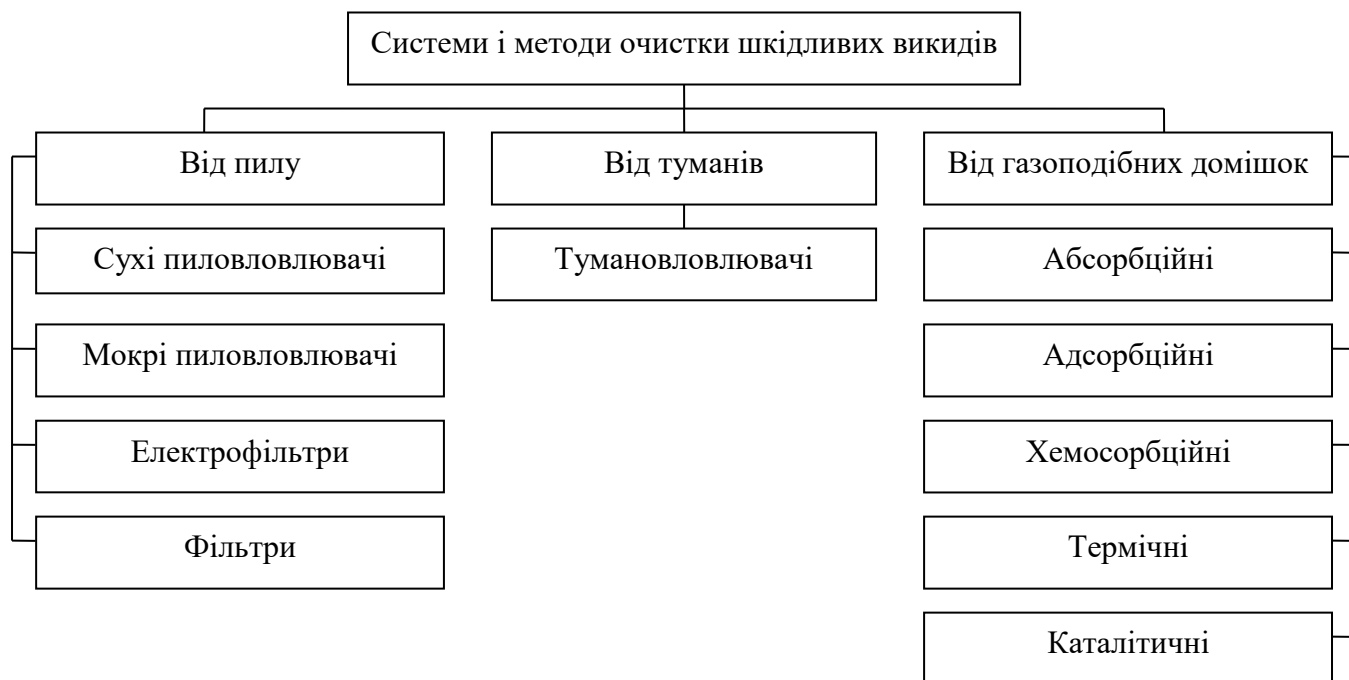


Рис. 6.2. Системи і методи очищення шкідливих викидів

При підвищеному вмісті пилу в повітрі використовують пиловловлювачі і електрофільтри. Фільтри застосовують для тонкого очищення повітря з концентрацією домішок менше 100 мг/м^3 .

Для очищення повітря від туманів (наприклад, кислот, лугів, масел і ін. рідин) використовують системи фільтрів, які називають тумановловлювачами.

Засоби захисту повітря від газопароподібних домішок залежать від вибраного методу очищення. За характером протікання фізико-хімічних процесів виділяють метод абсорбції (промивка викидів розчинниками домішки), хемосорбції (промивка викидів розчинами реагентів, що зв'язують домішки хімічно), адсорбції (поглинання газоподібних домішок за рахунок каталізаторів) і термічної нейтралізації.

6.2. Методи і системи очищення повітря від газоподібних домішок

Очистка викидів в атмосферу складається з двох принципово різних процесів:

- очистка від аерозолів – видалення зважених твердих і рідких домішок, що містяться у викидах (пилу, диму, крапельок туману);
- фізико-хімічна очистка – видалення або знешкодження тих або інших газо- і пароподібних домішок.

Одним із шляхів запобігання забруднення повітряного басейну газами є очистка газоподібних відходів перед їх викидом в атмосферу. Важливою перевагою цього напрямку, з точки зору охорони повітряного басейну, є його надійність. Крім того, виникає можливість утилізації цінних газоподібних відходів.

Очистка відхідних газів від газоподібних забруднень ускладнюється рядом обставин, а саме:

- великі сумарні об'єми газоподібних викидів;
- підвищена температура відхідних газів;
- непостійність концентрацій, тобто вміст газоподібних домішок в технологічних викидах може змінюватись в широких межах

- наявність твердих включень.

У зв'язку з наведеними обставинами, очистка промислових викидів від газоподібних шкідливих домішок, проводиться в декілька етапів, які забезпечують відділення твердих включень, зниження температури газів та вловлювання газоподібних домішок.

Оскільки, для газоочистки в основному використовуються засоби хімічної технології, то класифікація засобів знешкодження викидів практично співпадає з класифікацією процесів і апаратів хімічної промисловості, що виробляють шкідливі викиди як відходи основного виробництва. За характером протікання фізико-хімічних процесів здійснення процесів очистки промислових викидів від газоподібних домішок виділяють декілька груп методів:

- промивання газоподібних викидів розчинниками, які хімічно не сполучаються з забруднюючими речовинами (метод абсорбції);
- промивання газоподібних викидів розчинами реагентів, які хімічно зв'язують газоподібні домішки (метод хемосорбції або хімічних реакцій);
- поглинання газоподібних домішок активними поверхнями твердих речовин (метод адсорбції);
- знешкодження домішок за рахунок каталітичних реакцій;
- високотемпературне доспалювання (термічний метод).

Видалення газоподібних компонентів (сірчистого ангідриду, сірководню, хлору, хлористого водню і ін.), що містяться в технологічних і димових викидах проводиться хімічною очисткою газів методами абсорбції, адсорбції і хемосорбції.

Метод абсорбції полягає в поглинанні окремих компонентів газової суміші абсорбентом (поглиначем), в якості якого виступає рідина. Абсорбент вибирають залежно від умов розчинності в ньому газу, що підлягає видаленню з газової суміші. Наприклад, для очищення газів від аміаку, хлористого і фтористого водню як абсорбент застосовують воду, для вловлювання водяної пари – сірчану кислоту, для уловлювання ароматичних вуглеводнів – масла.

При абсорбції відбувається конвективна дифузія паро- і газоподібних компонентів газу, що очищається, в рідкі поглиначі. Для високоефективного вилучення забруднюючої речовини необхідне добре перемішування вилучаємого газу з абсорбентом. Це реалізується при очищенні вентиляційного повітря, що відсмоктується з травильних і гальванічних ванн, в колонах з насадками, в форсуночних і барботажно-пінних апаратах.

Регенерацію (відновлення) розчинника здійснюють зниженням загального (або парціального) тиску, підвищенням температури або тим і іншим одночасно.

Метод хемосорбції заснований на поглинанні газів і пари твердими або рідкими поглиначами, внаслідок чого утворюються малолеткі і малорозчинні сполуки. Хемосорбцію раціонально застосовувати при низьких концентраціях забруднювачів в газових сумішах, що очищаються. Хемосорбція полягає в промивці газу розчинами, які вступають в хімічні реакції з окремими газоподібними компонентами, які містяться в газі, що дозволяє витягувати їх або знешкоджувати. Наприклад, очищення газів від оксидів азоту проводиться за допомогою вапняного розчину. Для очищення газів від сірководню застосовують миш'яково-лужний розчин. Очищення високосірчистих газоподібних продуктів згорання енергетичного

палива проводять шляхом пропуску диму через морську воду. Ступінь очищення газу досягає при цьому 95%.

Метод адсорбції заснований на вловлюванні шкідливих газових домішок поверхнею твердих тіл. Адсорбція застосовується при незначному вмісті паро- і газоподібних забруднюючих компонентів (пари розчинників, ефіру, ацетону, різних вуглеводнів) в газоповітряній суміші. Найбільш широко відомий і поширений як адсорбент активоване вугілля. Його застосовують для очищення газів від органічної пари і деяких інших домішок. Застосовують також активований глинозем, силікагель, активований оксид алюмінію і ін. Очищення газів здійснюють через нерухомі шари адсорбенту і рухомі шари.

Для перетворення забруднювачів на нешкідливі речовини необхідне поєднання хімічних і фізичних процесів. З цією метою найчастіше використовуються процеси термічного окислення і термічної деструкції. При здатності горючих газів і пари, що входять до складу вентиляційних і технологічних викидів, згорати з утворенням менш токсичних речовин використовується термічна нейтралізація. Вона проводиться по трьом схемам – каталітичне доспалювання, термічне окислення, пряме спалювання.

Каталітичне доспалювання (термокаталіз) використовується для перетворення токсичних компонентів, що містяться у відхідних газах, в нетоксичні або менш токсичні шляхом їх контакту з каталізатором. Дія каталізаторів виявляється в проміжній хімічній взаємодії каталізатора з реагуючими речовинами, внаслідок чого утворюються проміжні з'єднання. Як каталізатори використовують метали або їх з'єднання Pt, Pd, Cu і ін. Каталізатори мають вид куль, кілець або іншу форму. Для каталітичного доспалювання необхідна достатня температура і швидкість руху газів. Наприклад, оксид вуглецю доспалюється при температурі 316...343 °C, пропан – 293...332 °C, толуол – 200...250 °C, ацетилен – 207...241 °C, альдегіди – 173...234 °C і т.д.

Каталітичні нейтралізатори застосовуються для знешкодження CO, летких вуглеводнів, розчинників, відпрацьованих автомобільних газів. Ці способи можуть застосовуватись до забруднювачів всіх агрегатних станів, але з обмеженим складом оброблюваної речовини. Термічній обробці з метою знешкодження можуть бути піддані лише речовини, молекули яких складаються з атомів вуглецю, водню і кисню. Інакше установки термознешкодження переходять в розряд джерел забруднення атмосфери, і нерідко – вкрай небезпечних.

Термічне окислення використовується у разі, коли спалювані гази мають високу температуру, але не містять достатньо кисню або коли концентрація горючих речовин незначна і недостатня для підтримки полум'я. У першому випадку процес термічного окислення проводять в камері з подачею свіжого повітря (допалювання CO, C_mH_n), а в другому – при подачі додаткового природного газу. При цьому відбувається доокислення з'єднань при високій температурі і достатній кількості кисню (наприклад, доокислення оксиду вуглецю в діоксид вуглецю, оксиду сірки в діоксид сірки і т.д.).

Пряме спалювання використовується в тих випадках, коли гази, що очищаються, володіють енергією горіння, факельного спалювання горючих відходів. Так нейтралізуються HCN у факелах нафтохімічних заводів.

Відповідні апарати для знешкодження газових викидів називаються абсорберами, адсорберами, установками (печами) термодеструкції (піролізу, крекінгу, риформінгу), термоокислення (доспалювання), термokatалітичними установками (печами, реакторами), хімічними реакторами. В межах цих груп апарати розрізняють за конструкцією, типорозмірами і окремими відмінними ознаками.

Методи очистки вибирають залежно від фізико-хімічних властивостей забруднюючої речовини, її агрегатного стану, концентрації в газоповітряній суміші, що підлягає очистці, і ін.

Розділ 7

Абсорбційна і хемосорбційна очистка газових викидів

7.1. Використання методів абсорбції і хемосорбції для вловлювання газоподібних домішок

Метод абсорбції базується на властивостях деяких рідин і твердих речовин при контакті з багатокомпонентним газовим середовищем вибірково витягувати з нього окремі інгредієнти і поглинати (сорбувати) їх.

Абсорбція – поглинання газів або пари з газових або парогазових сумішей рідкими поглиначами, які називають абсорбентами. Можливість здійснення процесу абсорбції ґрунтується на розчинності газів в рідинах. Процес абсорбції є вибіркоким і оборотним, що дає можливість застосовувати його не тільки з метою отримання розчинів газів в рідинах, але також і для розділення газових або парових сумішей.

У останньому випадку після вибіркової абсорбції одного або декількох компонентів з газової або парової суміші проводять десорбцію – виділення цих компонентів з рідини – і таким чином здійснюють розділення. Регенерований абсорбент знову повертається на абсорбцію.

Поглинання газу може відбуватися або за рахунок його розчинення в абсорбенті, або в результаті його хімічної взаємодії з абсорбентом. У першому випадку процес називають фізичною абсорбцією, в другому – хемосорбцією. Можливо також поєднання обох механізмів процесу. Компоненти газової суміші, що абсорбуються, називають абсорбтивом, а ті що не абсорбуються – інертом.

Фізична сутність процесу абсорбції пояснюється так званою теорією плівки, згідно з якою при дотику рідини та газів на поверхні розділу фаз утворюється рідинна та газова плівка. За рахунок сил дифузії, розчинний в рідині компонент газоповітряної суміші проникає спочатку крізь газову плівку, а потім – крізь рідинну і потрапляє у внутрішні шари абсорбенту, розподіляючись в його об'ємі. Для проходження процесу дифузії необхідно, щоб концентрація вловлюваного компоненту в газоповітряній суміші була вищою, ніж його рівноважна концентрація над поверхнею рідини. Чим менш насичений розчин, тим більше газу він поглинає. Якщо концентрація вловлюваного компоненту в газовій суміші менша, ніж його рівноважна концентрація над поверхнею рідини, дифузія проходить в зворотному напрямку. При цьому спостерігається виділення розчиненого компоненту із розчину в газову фазу – десорбція, – що дозволяє вилучити поглинуті речовини із абсорбенту для їх утилізації або регенерації абсорбенту.

Абсорбентами служать окремі рідини або розчини активного компоненту в рідкому розчиннику. У всіх випадках до абсорбентів висувають ряд вимог, серед яких найбільш істотними є: висока здатність абсорбції, селективність, низький тиск пари, хімічна інертність по відношенню до поширених конструкційних матеріалів (при фізичній абсорбції – також до компонентів газової суміші), нетоксичність, вогне- і вибухобезпечність, доступність і не висока вартість.

При проведенні абсорбції як абсорбент застосовують воду, органічні розчинники, не вступаючи в реакцію з вилучаемим газом, і водні розчини цих

речовин. При хемосорбції як абсорбент використовують водні розчини солей, органічні речовини і водні суспензії різних речовин.

Якщо розчинність газів при 0 °С і парціальному тиску 101,3 кПа складає сотні грам на 1 кг абсорбенту, то такі пари називають добре розчинними. Для видалення з технічних викидів таких газів, як NH_3 , HCl і HF , доцільно застосовувати як абсорбент воду.

Недоцільно використовувати воду для очищення викидів з нерозчинними в ній органічними домішками. Подібні забруднювачі як правило добре поглинаються органічними рідинами, серед яких можуть використовуватися як абсорбенти висококиплячі речовини, такі як етаноламіни і вуглеводні (мінеральні мастила).

Абсорбенти, які використовують для очищення відхідних газів приведені в табл. 7.1.

Таблиця 7.1.

Абсорбенти, які використовують для очищення відхідних газів

Компоненти, що поглинаються	Абсорбенти
Оксиди азоту N_2O_3 , NO_2 , N_2O_5	Вода, водні розчини і суспензії: NaOH , Na_2CO_3 , NaHCO_3 , KOH , K_2CO_3 , KHCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, MgCO_3 , $\text{Ba}(\text{OH})_2$, BaCO_3 , NH_4HCO_3
Оксид азоту NO	Розчини FeCl_2 , FeSO_4 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, NaHCO_3 , Na_2SO_3 , NaHSO_3
Діоксид сіри SO_2	Вода, водні розчини: Na_2SO_3 (18...25%), NH_4OH (5...15%), $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3 (15...20%), NaOH (15...25%), KOH , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ (20...25%), ZnSO_3 , K_2CO_3 ; суспензії CaO , MgO , CaCO_3 , ZnO , золи; ксилідин – вода в співвідношенні 1:1, диметиланілін $\text{C}_6\text{H}_3(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2$
Сірководень H_2S	Водний розчин Na_2CO_3 + Na_3AsO_4 (Na_2HASO_3); водний розчин As_2O_3 (8...10 г/л) + NH_3 (1,2...1,5 г/л) + $(\text{NH}_4)_3\text{AsO}_3$ (3,5...6 г/л); моноетаноламін (10...15%); розчини K_3PO_4 (40...50%), NH_4OH , K_2CO_3 , Na_2CO_3 , CaCN_2 , натрієва сіль антрахінондисульфокислоти
Оксид вуглецю CO	Рідкий азот; мідно-аміачні розчини $[\text{Cu}(\text{NH}_3)]_n \times \text{COCH}$
Діоксид вуглецю CO_2	Водні розчини Na_2CO_3 , K_2CO_3 , NaOH , KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NH_4OH , етаноламіни RNH_2 , R_2NH
Хлор Cl_2	Розчини NaOH , KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3 , K_2CO_3 , MgCO_3 , CaCO_3 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$; тетрахлоридметан CCl_4
Хлористий водень HCl	Вода, розчини NaOH , KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3 , K_2CO_3
Сполуки фтору HF , SiF_4	Вода, розчини Na_2CO_3 , NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Перед обробкою органічними абсорбентами із відхідних газів необхідно видалити дисперсні домішки. Інакше абсорбенти швидко забруднюються і перетворюються у відходи, які практично не піддаються очищенню.

Органічні абсорбенти повинні мати низький тиск насиченої пари при температурі процесу. Розчинники з недостатньо низькою пружністю пари інтенсивно випаровуватимуться і забруднюватимуть оброблювані гази. Крім того, низькокиплячий абсорбент складно регенерувати, оскільки десорбувати з нього вловлену речовину нагріванням неможливо.

На інтенсивність переходу забруднювача з газової фази в рідку великий вплив роблять температура і тиск процесу, а також спосіб організації контакту фаз.

Із зростанням тиску і зниженням температури швидкість абсорбції збільшується. Абсорбенти, що працюють при негативних (за Цельсієм)

температурах, прийнято називати холодоносіями, а процес абсорбції, що протікає в таких умовах, – контактною конденсацією.

Абсорбційну очистку викидів в атмосферу застосовують як для вилучення цінного компоненту з газу, так і для санітарного очищення газу. Вважають, що доцільно застосовувати абсорбцію, якщо концентрація даного компоненту в газовому потоці складає понад 1 %.

Поєднуючи абсорбцію з десорбцією, можна багато разів використовувати майже без втрат рідкий поглинач (абсорбент) в замкнутому контурі апаратів: абсорбер-десорбер-абсорбер, виділяючи поглинений компонент в чистому вигляді.

Розрізняють фізичну абсорбцію і хемосорбцію. При фізичній абсорбції розчинення газу в рідині не супроводжується хімічною реакцією або, принаймні, впливом цієї реакції на швидкість процесу можна нехтувати. Внаслідок цього фізична абсорбція не супроводжується тепловим ефектом. Якщо в цьому випадку температура початкових потоків газу і рідини дещо відрізняються, то таку абсорбцію можна розглядати як ізотермічну.

На рис. 7.1. представлена принципова схема установки для абсорбції певного компоненту з газового середовища із наступним його вилученням з абсорбенту (десорбції).

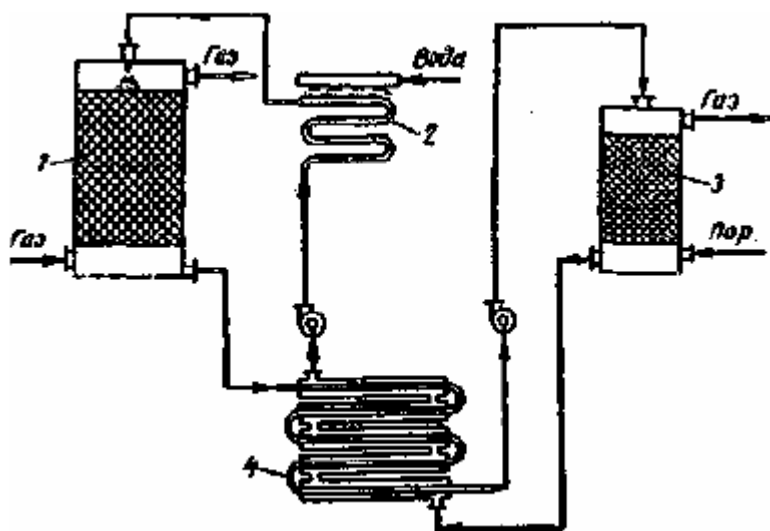


Рис. 7.1. Принципова схема установки для абсорбційно-десорбційного вловлювання певного компоненту з газової суміші:

1 – абсорбер; 2 – холодильник; 3 – десорбер; 4 – теплообмінник

Газова суміш, що містить вилучаємий із неї компонент, надходить в абсорбер, де відбувається її контакт з абсорбентом, який поглинає даний компонент. Газ, який уже очищений від компоненту, вилучається (очищене повітря може бути викинуто в атмосферу), а розчин поглинача, що містить абсорбований компонент, надходить в теплообмінник, де нагрівається. Нагрітий розчин насосом подається в десорбер, де з нього вилучається (десорбується) поглинений компонент шляхом випаровування в наслідок нагрівання поглинача паром. Поглинач, вивільнений від компоненту, поступає в теплообмінник, де віддає теплоту абсорбенту при його протиточному русі в десорбер, а потім прямує в холодильник, пройшовши який, знову надходить в

абсорбер. Коло замкнулося. По такому циклу працює установка для абсорбційно-десорбційного вловлювання пари і газів з газоповітряної суміші.

Для методу хімічних реакцій (хемосорбції), на відміну від методу абсорбції, характерна фізико-хімічна взаємодія компонентів очищувального газу та поглинача. При цьому основне значення при вловлюванні газових домішок належить хімічному процесу. В результаті взаємодії вловлюваних компонентів з твердими або рідкими поглиначами утворюються слаболеткі або малорозчинні сполуки. При необхідності утилізації вловлюваних речовин процеси хемосорбції доцільно проводити зворотними, що можна досягти підбором відповідних поглиначів (хемосорбентів).

Поглиналина здатність хемосорбенту залежить переважно від його хімічного складу і практично не залежить від тиску та концентрації вловлюваної домішки. Тому процеси хемосорбції в цілому є стабільнішими, ніж процеси абсорбції та адсорбції. Якщо розчини хімічних реагентів використовують як хемосорбенти, то такі методи називають мокрими, а якщо тверді речовини – сухими. В процесі очистки повітря від газів використовують як зворотні (циклічні), так і незворотні процеси хемосорбції. В циклічних методах хемосорбції проводять регенерацію хемосорбенту та повернення його в цикл.

Ефективність мокрих методів хемосорбції вища, ніж сухих. Вони екологічно безпечніші, збільшується ступінь утилізації вловлюваної домішки. Проте, поруч з цим, виникає проблема очистки стічних вод.

Апаратне оформлення методу хемосорбції аналогічне іншим сорбційним методам (абсорбція, адсорбція). В табл. 7.2 перераховані хемосорбенти, які рекомендовані для вловлювання деяких газоподібних (і пароподібних) домішок із газо- та пароповітряної суміші.

Таблиця 7.2

Хемосорбенти, які використовують для очистки викидів

Вловлювана домішка	Рекомендований хемосорбент
Сірководень	Розчини лугів, водний розчин кальцієвої солі диметилалілоцтової кислоти, гідроксид феруму, етаноламіновий розчин, оксисульфоарсенатна кислота.
Хлор	Розчини лугів, активоване вугілля, ошурки феруму, чотирехлористий карбон, вапнякове молоко.
Фтороводень	Вапнякове молоко, вапняк, вапно, розчини лугів.
Аміни	Розчин сульфатної кислоти.
Меркаптани	Розчин гіпохлориду натрію в лужному середовищі.

Залежно від вилучаємого компоненту, а також виду розчинника або поглинача, який використовується для очистки, ефективність хемосорбційної установки може досягати 0,75...0,92.

7.2. Конструкції і принцип дії абсорберів

Процеси абсорбції проводять в спеціальних апаратах – абсорберах. Абсорбція, як і інші процеси масообміну, протікає на розвиненій поверхні розподілу фаз. Для інтенсифікації процесу абсорбції необхідні апарати з розвиненою поверхнею

контакту між рідкою і газовою фазами (абсорбенту з газом-носієм). За способом утворення цієї поверхні і диспергації абсорбенту, їх можна підрозділити на чотири основні групи:

- 1) плівкові;
- 2) насадочні;
- 3) барботажні (тарілчасті);
- 4) розпилюючі.

У плівкових абсорберах поверхнею контакту фаз є поверхня рідини, текучої по твердій, зазвичай вертикальній стінці. До цього виду апаратів відносяться:

- трубчасті абсорбери;
- абсорбери з плоскопаралельною або листовою насадкою;
- абсорбери з висхідним рухом плівки рідини.

Насадочні абсорбери являють собою колони, заповнені насадкою – твердими тілами різної форми, яка служить для збільшення поверхні контакту дотичних фаз – газу і рідини.

Багаточисельні типи барботажних абсорберів можна розділити на три основні групи:

- абсорбери з суцільним барботажним шаром, в яких здійснюється безперервний контакт між фазами;
- абсорбери тарілчастого типу із ступінчастим контактом між фазами, причому ступені (тарілки) розміщені в одному апараті;
- абсорбери з механічним перемішуванням рідини.

Барботажні абсорбери тарілчастого типу, що мають найбільше застосування, виконують у вигляді колон круглого (іноді прямокутного) перетину, по висоті яких розташовані тарілки різної конструкції, причому на кожній тарілці здійснюється один ступінь контакту. Таким чином, в даних абсорберах відбувається ступінчастий контакт із з'єднанням ступенів протитечією: газ надходить в нижню частину колони і виходить зверху; рідина підводиться зверху і виходить знизу. На кожній тарілці, залежно від її конструкції, може здійснюватися той або інший вид руху фаз, зазвичай перехресний потік або повне перемішування рідини.

У розпилюючих абсорберах контакт між фазами досягається розпилюванням або розбризкуванням рідини в газовому потоці. Ці абсорбери підрозділяють на наступні групи:

- форсуночні розпилюючі абсорбери, в яких рідина розпилюється на краплі форсунками;
- швидкісні прямоточні розпилюючі абсорбери, в яких розпилювання рідини здійснюється за рахунок кінетичної енергії газового потоку;
- механічні розпилюючі абсорбери, в яких рідина розпилюється деталями, що обертаються.

За способом організації масообміну пристрої абсорбції прийнято ділити на апарати з безперервним і ступінчастим контактом фаз. До пристроїв з безперервним контактом можна віднести насадочні колони, розпилюючі апарати (порожністі скрубери, скрубери Вентурі, ротоклони і ін.), однополчасті барботажні і пінні пристрої, а до пристроїв із ступінчастим контактом – тарілчасті колони, багатополчасті барботажні і пінні пристрої.

Частина подібних пристроїв застосовуються для мокрого пилоочищення. В

принципі їх можна було б використовувати і для сумісного вловлювання дисперсних і газових забруднювачів, проте здійснити це на практиці вдається рідко. Очисні пристрої створювалися і удосконалювалися або для поглинання газоподібних домішок, або для пилозоловлювання. Тому сучасні абсорбери для вловлювання газоподібних домішок не пристосовані для обробки потоків з дисперсними забруднювачами, а високоефективні пилозоловлювачі, як правило, непридатні для істотного вилучення газоподібних домішок. Серійні мокрі пиловловлювачі можуть бути використані тільки для попередньої обробки з метою очищення газового потоку від дисперсних домішок перед абсорбційною обробкою.

Для абсорбції газових забруднювачів найчастіше використовуються насадочні і тарілчасті колони.

7.2.1. Насадочні абсорбери

Насадочні абсорбери одержали найбільше застосування в промисловості. Цими абсорберами (рис. 7.2) є колони, заповнені насадкою – твердими тілами різної форми. У насадочних колонах забезпечується кращий контакт оброблюваних газів з абсорбентом аніж чим в порожнистих розпилювачах, завдяки чому інтенсифікується процес масообміну і зменшуються габарити очисних установок.

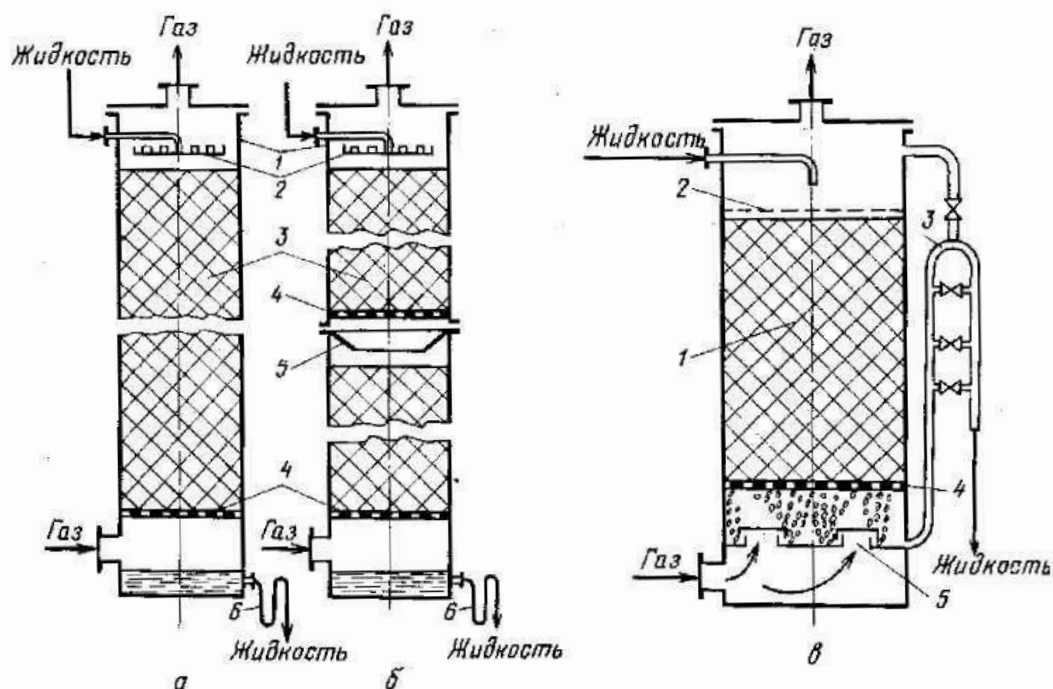


Рис. 7.2. Схеми насадочних абсорберів:

а – із суцільним шаром насадки; *б* – із секційним завантаженням насадки (1 – корпус; 2 – розподільник рідини; 3 – насадка; 4 – опорна решітка; 5 – перерозподільовач рідини; 6 – гідравлічні затвори); *в* – емульгаційна насадочна колона (1 – насадка; 2 – сітка, що фіксує насадку; 3 – гідравлічний затвор; 4 – опорна решітка; 5 – розподільник газу).

В насадочній колоні 1 (рис. 7.2, *а*, *б*) насадка 3 вкладається на опорну решітку 4, що мають отвори або щілини для проходження газу і стоку рідини, яка достатньо

рівномірно зрошує насадку 3 за допомогою розподільника 2 і стікає вниз по поверхні тіл насадок у вигляді тонкої плівки. Проте рівномірний розподіл рідини по всій висоті насадки по перетину колони зазвичай не досягається, що пояснюється пристінковим ефектом. Внаслідок цього рідина має тенденцію розтікатися від центральної частини колони до її стінок і практично повністю відтісняється від місця введення абсорбенту до периферії колони на відстань, рівній чотирьом-п'яти її діаметрам. Тому часто насадку в колону завантажують секціями заввишки в чотири-п'ять діаметрів (але не більше 3...4 метрів в кожній секції), а між секціями (шарами насадки) встановлюють перерозподілювачі рідини 5, призначення яких полягає у спрямуванні рідини від периферії колони до її осі.

Будова насадочної колони і розташування її конструктивних елементів зображено на рис. 7.3.

Співвідношення витрат рідини і газу, що надходять в колону, повинно відповідати оптимальному гідравлічному режиму роботи шару насадки.

Гідродинамічний режим в протиточних насадочних колонах полягає у залежності гідравлічного опору зрошуваної насадки від швидкості газу в колоні.

Перший режим – плівковий – спостерігається при невеликій щільності зрошування на малих швидкостях газу. У цьому режимі відсутній вплив газового потоку на швидкість стікання по насадці рідкої плівки і, отже, на кількість затримуваної в насадці рідини. Плівковий режим закінчується перехідною точкою, яка називається точкою підвисання.

Другий режим – режим підвисання (або гальмування). Після точки підвисання підвищення швидкості газу призводить до помітного збільшення сил тертя до рідини на поверхні контакту фаз і пригальмування рідини газовим потоком. Внаслідок цього швидкість перебігу плівки рідини зменшується, а її товщина і кількість утримуваної рідини в насадці збільшуються. У режимі підвисання з підвищенням швидкості газу порушується спокійний перебіг плівки рідини, з'являються завихорення, бризки, збільшується змочена поверхня насадки і відповідно – інтенсивність процесу масообміну.

Третій режим – режим емульгування. Із значним підвищенням швидкості газу відбувається накопичення рідини у вільному об'ємі насадки до тих пір, поки сила тертя між стікаючою рідиною і газом, що піднімається по колоні, не зрівноважить силу тяжіння рідини, що знаходиться в насадці. При цьому настає звернення, або інверсія, фаз (рідина стає суцільною фазою, а газ – дисперсною). Утворюється газорідина дисперсна система, що на вигляд нагадує барботажний шар (піну) або газорідинну емульсію. Режим емульгування починається в найвузшому перетині насадки, щільність засипки якої нерівномірна по перетину колони. Шляхом ретельного регулювання подачі газу режим емульгування може бути встановлений по всій висоті насадки.

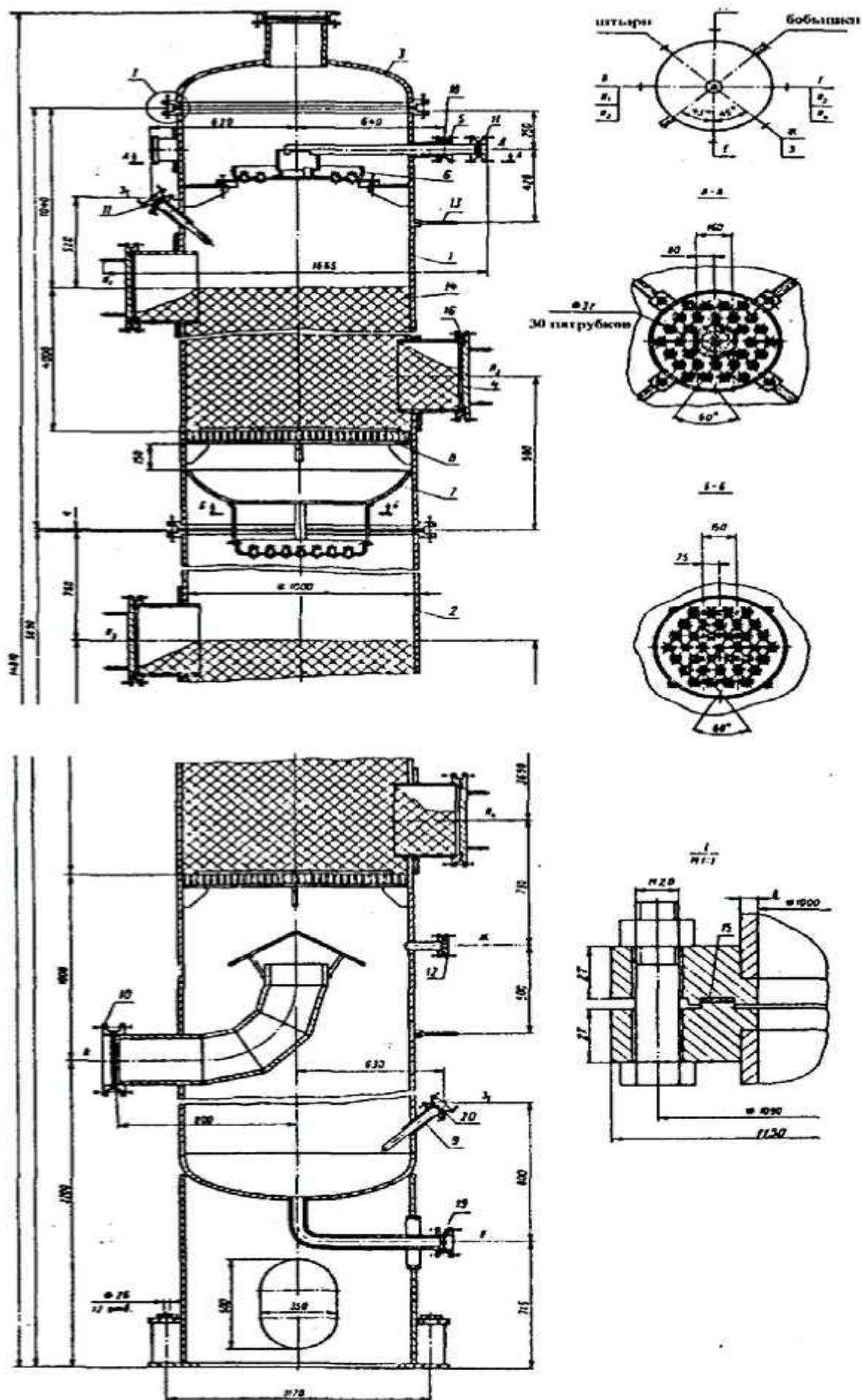


Рис. 7.3. Конструкція насадочного абсорбера

Режим емульгування відповідає максимальній ефективності насадочних колон переважно внаслідок збільшення контакту фаз, який в цьому режимі визначається не стільки поверхнею тіл насадок, скільки поверхнею утвореної газорідинної емульсії, яка заповнює весь вільний об'єм насадки. Слід зазначити, що це підвищення ефективності насадочної колони супроводжується різким збільшенням її гідравлічного опору. У насадочних колонах без спеціальних пристроїв підтримувати режим емульгування дуже важко тому, що малий інтервал зміни швидкостей газу, при якому насаджувальна колона працює в цьому режимі. Тому розроблена спеціальна конструкція колони емульгування (див. рис. 7.2, в).

Як правило, робота в режимі підвисання і емульгування доцільна тільки у випадку, якщо підвищення гідравлічного опору апарату не має істотного значення (наприклад, якщо абсорбер працює при підвищених тисках). Тому більшість насадочних адсорберів працюють в плівковому режимі (тобто при швидкостях газу до точки підвисання). Межею стійкої роботи насадочних колон є швидкість газу, яка відповідає точці інверсії (або захлинання).

Четвертий режим – режим виносу, або оберненого руху рідини, що виноситься з апарату газом. Цей режим в техніці не використовується.

Деякі поширені типи насадок показані на рис. 7.4, а характеристики насадок приведені в табл. 7.3.

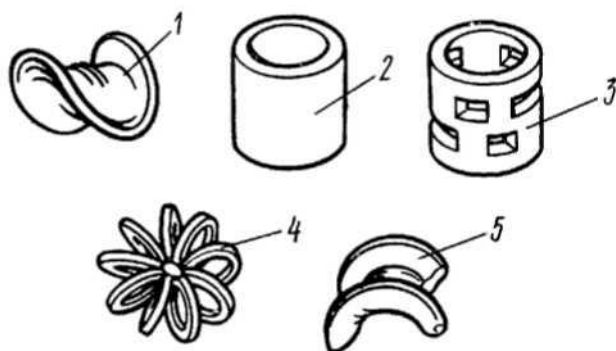


Рис. 7.4. Форми елементів насадки:

1 – сідло Берля; 2 – кільце Рашига; 3 – кільце Палля; 4 – розетка Теллера; 5 – сідло “Інталокс”

До основних характеристик насадки відносять її питому поверхню a ($\text{м}^2/\text{м}^3$) і вільний об'єм ε ($\text{м}^3/\text{м}^3$). Зазвичай величину ε визначають шляхом заповнення об'єму насадки водою. Відношення об'єму води до об'єму, займаного насадкою, дає величину ε . Ще однією характеристикою насадки є її вільний перетин s ($\text{м}^2/\text{м}^2$). Приймають, що вільний перетин насадки s рівний по величині її вільному об'єму, тобто $s = \varepsilon$.

Оскільки в насадочних колонах поверхнею контакту фаз є змочена поверхня насадки, тому насадка повинна мати якомога більшу поверхню в одиниці об'єму. Разом з тим для того, щоб насадка працювала ефективно, вона повинна задовольняти наступним вимогам: 1) добре змочуватися зрошуючою рідиною, тобто матеріал насадки по відношенню до зрошуючої рідини повинен бути ліюфільним; 2) чинити малий гідравлічний опір газовому потоку, тобто мати якомога більше значення вільного об'єму або перетину насадки; 3) створювати можливість для високих навантажень апарату по рідині і газу; для цього насадка повинна також

мати великі значення ε або d_e ; 4) мати малу щільність; 5) рівномірно розподіляти зрошуючу рідину; 6) бути стійкою до агресивних середовищ; 7) володіти високою механічною міцністю; 8) мати невисоку вартість.

Таблиця 7.3

Характеристика насадок

Насадка	Розмір, мм	Геометрична поверхня a_0 , м ² /м ³	Вільний об'єм ε_0 м ³ /м ³	Еквівалентний діаметр d_e , м	Число елементів в 1 м ³	Насипна густина, кг/м ³
Кільця Рашига	25	190	0,605	0,01275	50600	890
	50	93	0,74	0,0318	5530	580
Сідла типу "Інталокс"	25	230	0,77	0,0134	76600	575
	44	130	0,77	0,0237	14000	550
	50	100	0,81	0,0324	3400	505
Сідла Берля	25	235	0,74	0,0126	70000	840
Кільця Палля: з пропілену сталеві	50	112	0,86	0,0307	6800	100
	35	170	0,9	0,021	19200	455
	50	108	0,9	0,033	6400	415

Максимальну поверхню контакту на одиницю об'єму утворюють сідлоподібні насадки "Інталокс" і Берля. Вони мають і мінімальний гідравлічний опір, але вартість їх вища, ніж кілець. З кільцевих насадок якнайкращий контакт створюють кільця Палля, але вони складні у виготовленні і дорожче за кільця Рашига.

Як насадка найширше застосовують тонкостінні кільця Рашига, що мають висоту рівну діаметру, який змінюється в межах 15...150 мм. Кільця малих розмірів засипають в колону навалом. Великі кільця (від 50 на 50 мм і вище) укладають правильними рядами, зсунутими по відношенню один до одного. Такий спосіб заповнення апарату насадкою називають завантаженням в укладку, а завантажену у такий спосіб насадку – регулярною. Регулярна насадка має ряд переваг перед нерегулярною, навалом засипаною в колону: володіє меншим гідравлічним опором, допускає великі швидкості газу. Проте регулярна насадка вимагає складніші за устроєм зрошувачі, ніж насадка, засипана навалом.

При виборі розмірів насадки необхідно враховувати, що із збільшенням розмірів її елементів збільшується допустима швидкість газу, а гідравлічний опір абсорбера насадки знижується. Загальна вартість колони з крупною насадкою буде нижча за рахунок зниження діаметру абсорбера, не дивлячись на те, що висота насадки дещо збільшиться в порівнянні з такою в абсорбері, заповненому насадкою менших розмірів. Це особливо стосується абсорбції добре розчинних газів. При абсорбції погано розчинних газів більш відповідною може бути і порівняно дрібна насадка.

Якщо необхідно провести глибокий розподіл газової суміші, що вимагає великого числа одиниць перенесення, то в цьому випадку раціональніше використовувати дрібну насадку. Перевагу надають дрібній насадці при проведенні абсорбції під підвищеним тиском, оскільки при цьому втрата напору в абсорбері складе малу частку від загального тиску газової суміші.

Насадочні абсорбери повинні працювати з максимально можливими швидкостями газового потоку, при яких насадка не захлинається. Зазвичай ця

швидкість перевищує половину швидкості захлинання. Для кілець Рашига її можна приймати до 60...80%, для сідлоподібних насадок – до 60...85%, для насадок Теллера – до 75...90% від швидкості захлинання. Параметри початку захлинання визначають за емпіричними співвідношеннями.

У випадку забруднених середовищ доцільно застосовувати регулярні насадки, зокрема при роботі під підвищеним тиском. Для цих середовищ можна використовувати також так звані абсорбери з плаваючою насадкою. Як насадка в таких абсорберах зазвичай застосовують легкі порожнисті кулі з пластмаси, які при достатньо високих швидкостях газу переходять в зважений стан. Внаслідок їх інтенсивної взаємодії така насадка практично не забруднюється.

У абсорберах з плаваючою насадкою можливе створення більш вищих швидкостей, ніж в колонах з нерухомою насадкою. При цьому збільшення швидкості газу призводить до розширення шару куль, що сприяє зниженню швидкості газу в шарі насадки. Тому істотне збільшення швидкості газового потоку в таких апаратах (до 3...5 м/с) не призводить до значного зростання їх гідравлічного опору.

До основних переваг насадочних колон слід перш за все віднести простоту пристрою і низький гідравлічний опір, а до недоліків – складність відведення теплоти, погану змочуваність насадки при низькій густині зрошування, великі об'єми насадки внаслідок недостатньо високої її ефективності (в порівнянні з тарілчастими апаратами).

7.2.2. Тарілчасті абсорбери

Тарілчасті абсорбери зазвичай являють собою вертикальні циліндри – колони, всередині яких на певній відстані один від одного по висоті колони розміщуються горизонтальні перегородки-тарілки. Тарілки служать для збільшення поверхні контакту фаз при наведеному русі цих фаз (рідина тече зверху вниз, а газ проходить від низу до верху) і багатократній взаємодії рідини і газу.

На кожній тарілці, залежно від її конструкції, можна підтримувати той або інший вид руху фаз (зазвичай перехресний потік або повне перемішування рідини).

Тарілки можна підрозділити на три основні групи:

1) тарілки перехресного типу, в яких рух газу і рідини здійснюється перехресним потоком. Ці тарілки мають спеціальні переливні пристрої для перетікання рідини з однієї тарілки на іншу, причому газ по переливах не проходить.

2) тарілки провального (беспереливного) типу, в яких переливні пристрої відсутні, так що газ і рідина проходять через одні і ті ж отвори. На цих тарілках контакт газу і рідини здійснюється по схемі повного перемішування рідини.

3) тарілки з однонаправленим рухом газу і рідини (прямоточні). В даному випадку газ виходить з отворів у напрямі руху рідини по тарілці; це викликає зниження повздовжнього перемішування рідини і сприяє руху рідини, що призводить до зменшення гідравлічного градієнта.

За способом зливу рідини з тарілки абсорбери цього типу підрозділяють на колони з тарілками із зливними пристроями і з тарілками без зливних пристроїв (із неорганізованим зливом рідини).

До тарілчастих апаратів із зливними пристроями відносяться колони з ковпачковими, сітчастими, клапанними і іншими тарілками. Ці тарілки мають

спеціальні пристрої для перетікання рідини з однієї тарілки на іншу – зливні трубки, кишені і ін. Нижні кінці зливних пристроїв занурені в рідину на розташованих нижче тарілках для створення гідрозасува, що запобігає проходженню газу через зливний пристрій.

Принцип роботи абсорберів такого типу показаний на рис. 7.5, *а* на прикладі колони з ковпачковими тарілками. Рідина подається на верхню тарілку, рухається уздовж тарілки від одного зливного пристрою до іншого, перетікає з тарілки на тарілку і віддається з нижньої частини абсорбера. Переливні пристрої на тарілках розташовують так, щоб рідина на сусідніх по висоті апарату тарілках протікала у взаємно протилежних напрямках. Газ поступає в нижню частину абсорбера, проходить через прорізи ковпачків (у інших абсорберах через отвори, щілини і так далі) рис. 7.5, *б* і потім потрапляє в шар рідини на тарілці, висота якого регулюється в основному висотою зливного порогу. При цьому газ в рідині розподіляється у вигляді бульбашок і струменів, утворюючи в ній шар піни, в якій відбуваються основні процеси масо- і теплообміну. Ця піна нестабільна, і при підході її до зливного пристрою рідина освітлюється. Пройшовши через всі тарілки, газ йде з верхньої частини апарату.

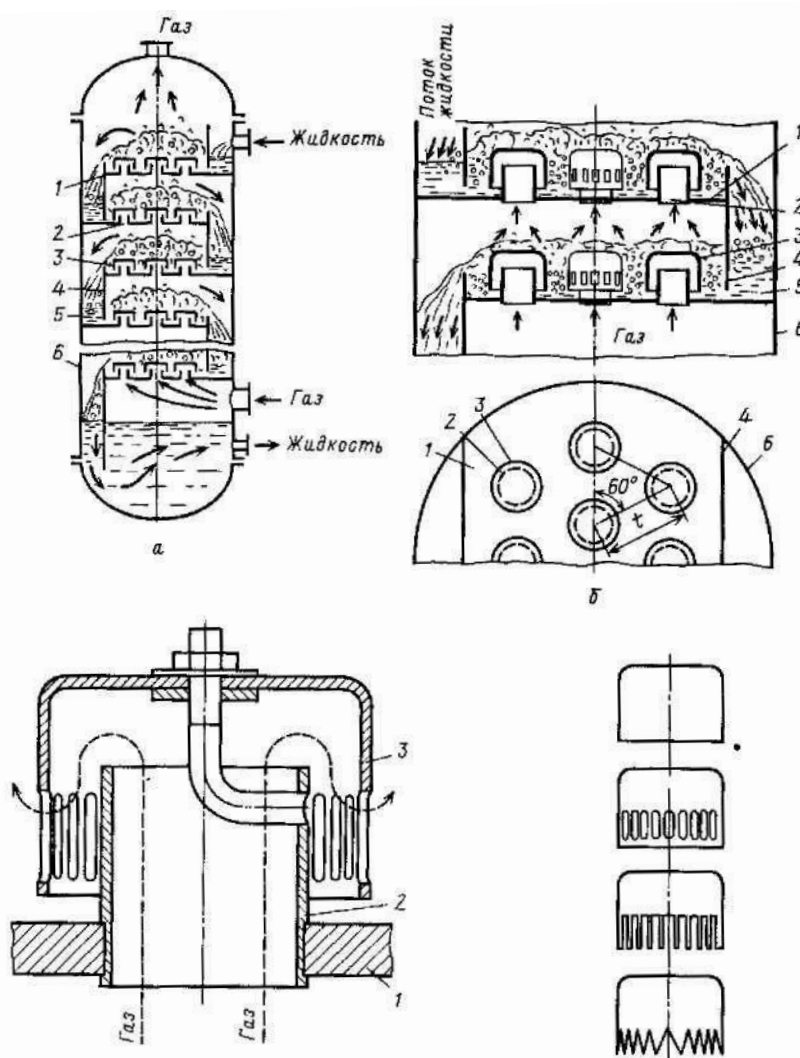


Рис. 7.5. Будова колони і ковпачкових тарілок з капсульними ковпачками
а – колона з тарілками; *б* – дві сусідні тарілки; *в* – капсульний ковпачок; *г* – форми

капсульних ковпачків (1 – тарілки; 2 – газові (парові) патрубки; 3 – круглі ковпачки; 4 – переточні перегородки (або труби) з порогами; 5 – гідравлічні затвори; 6 – корпус колони)

Для тарілчастих колон із зливними пристроями характерна гідродинамічна нерівномірність по довжині тарілки, яка є наслідком гідравлічного опору руху рідини по довжині тарілки. Ця нерівномірність пояснюється тим, що при русі рідини по тарілці її рівень підвищується (наприклад, через наявності ковпачків або під дією перпендикулярного потоку газу, що проходить через рідину), і по довжині шляху руху рідини виникає гідравлічний градієнт. Таке явище призводить до нерівномірного розподілу газу за площею тарілки: велика частина газу рухається через частину тарілки, прилеглу до зливного порогу, де рівень рідини нижчий, що стає особливо помітним на тарілках великих діаметрів, коли величина гідравлічного градієнта є значною. Для зниження гідравлічного градієнта в апаратах великого діаметру (від 1...2 м і вище) зменшують шлях проходження рідини (рис. 7.5, б, в).

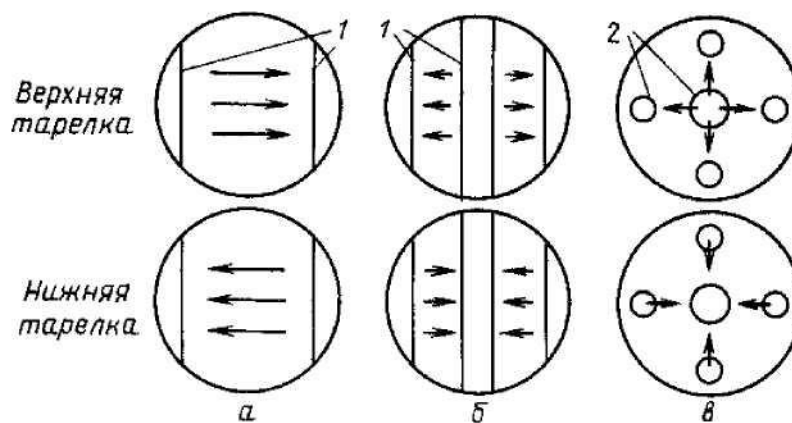


Рис. 7.6. Деякі типи зливних пристроїв тарілчастих колон

а – однопоточний пристрій із зливними перегородками 1; *б* – двохпоточний пристрій із зливними перегородками 1; *в* – пристрій для радіального напрямку рідини з переливними трубами 2

Основний вплив на ефективність тарілок будь-яких конструкцій роблять гідродинамічні умови їх роботи. Залежно від швидкості газу розрізняють три основні гідродинамічні режими роботи тарілчастих апаратів: бульбашковий, пінний і струменевий (або інжекційний). Ці режими розрізняються структурою газорідного шару на тарілці, яка в основному визначає його гідравлічний опір, висоту і поверхню контакту на тарілці.

Вибрати оптимальний контактний пристрій з великої кількості різних типів тарілок досить складно. Приведені нижче конструкції тарілок (рис. 7.7) характеризуються наступними показниками.

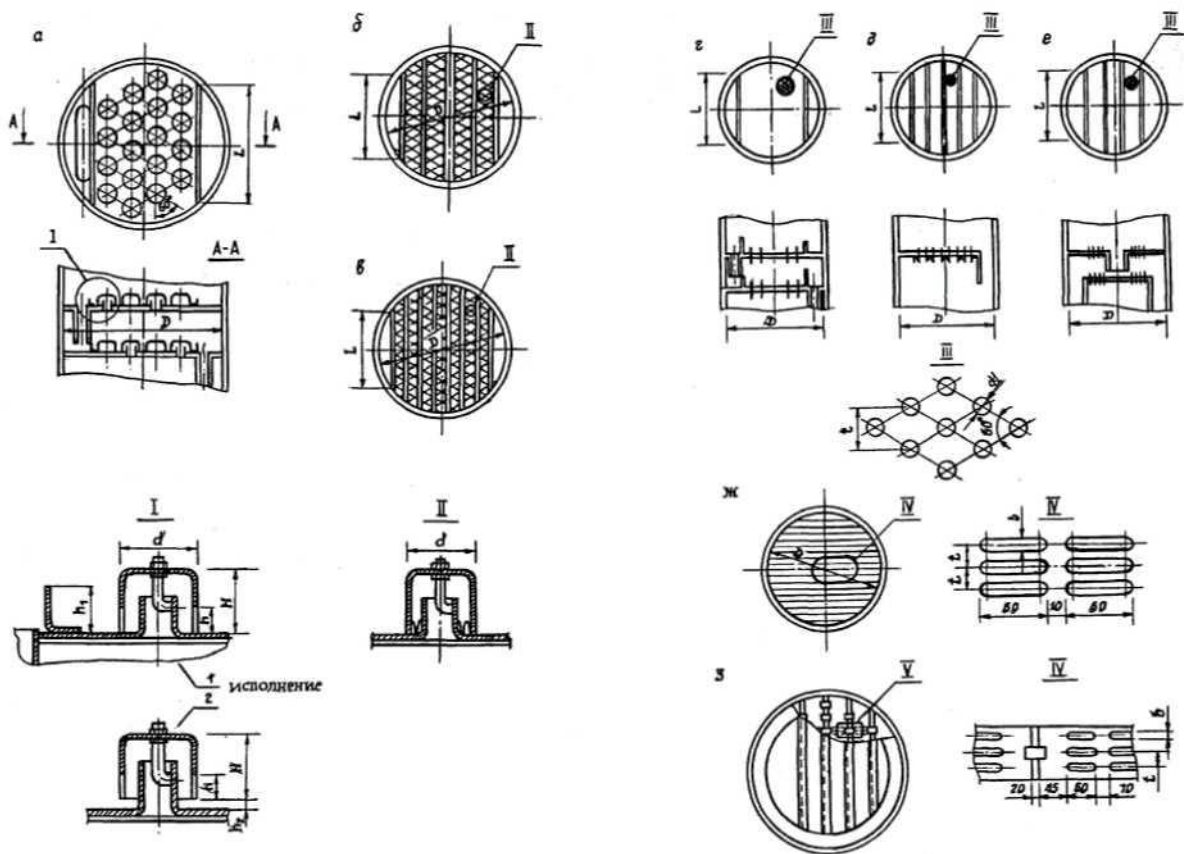
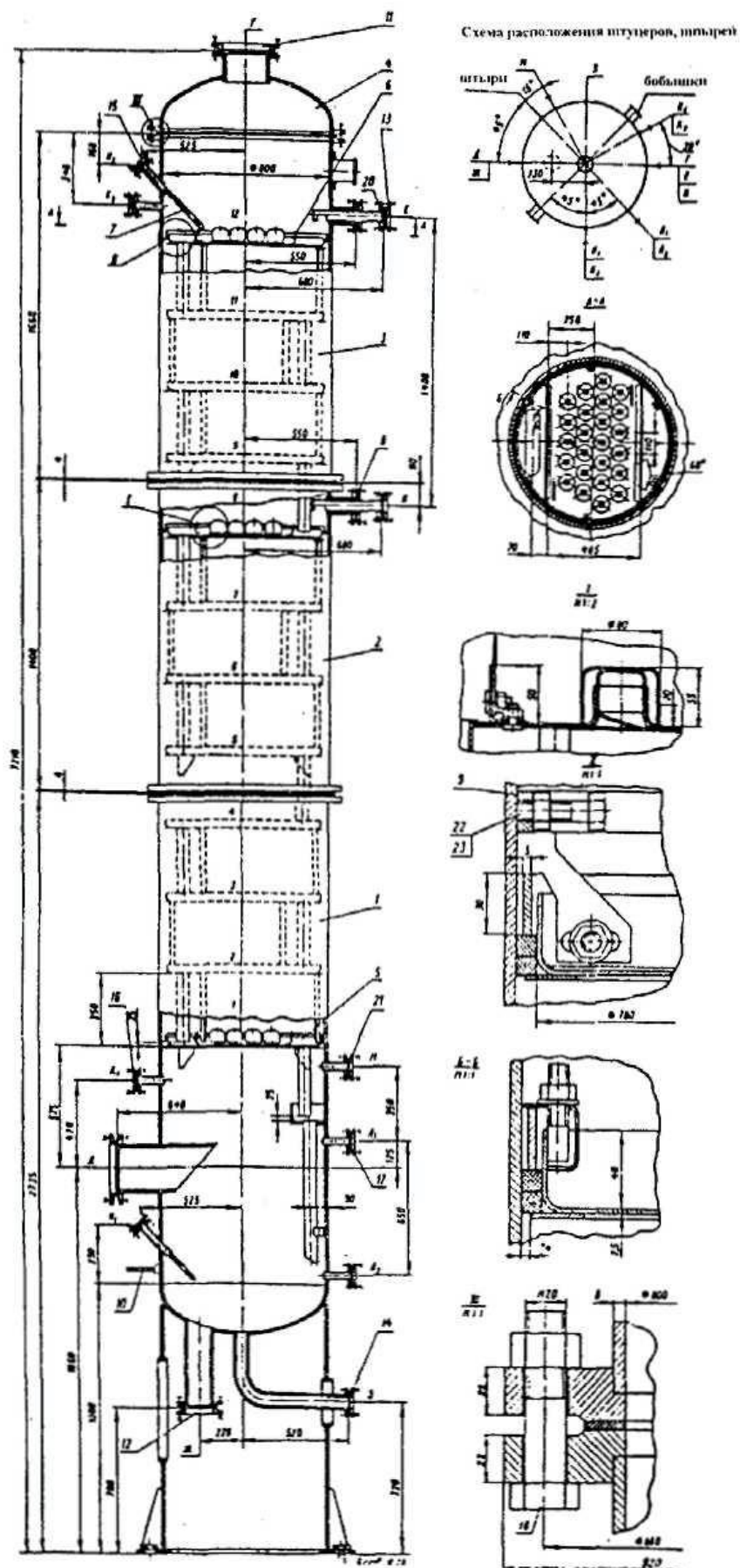


Рис. 7.7. Конструкції тарілок

а, б, в – ковпачкова; *г, д, е* – сітчаста; *ж, з* – решітчаста (провальна)

Ковпачкові тарілки стійко працюють при значних змінах навантажень по газу і рідині. Цей показник дуже важливий при організації процесу у виробничих умовах. Але недоліки ковпачкових тарілок досить істотні – вони складні за будовою, для їх виготовлення потрібні великі витрати металу, вони відрізняються великим гідравлічним опором і малою гранично допустимою швидкістю газу. Тому колони з ковпачковими тарілками витісняються ефективнішими конструкціями тарілчастих апаратів.

Будова тарілчастої колони з ковпачковими тарілками і розташування її конструктивних елементів показані на рис. 7.8.



Сітчасті тарілки. Ці тарілки (рис. 7.9) мають велике число отворів діаметром 2...8 мм, через які проходить газ в шар рідини на тарілці. Рівень рідини на тарілці підтримується переливним пристроєм 2.

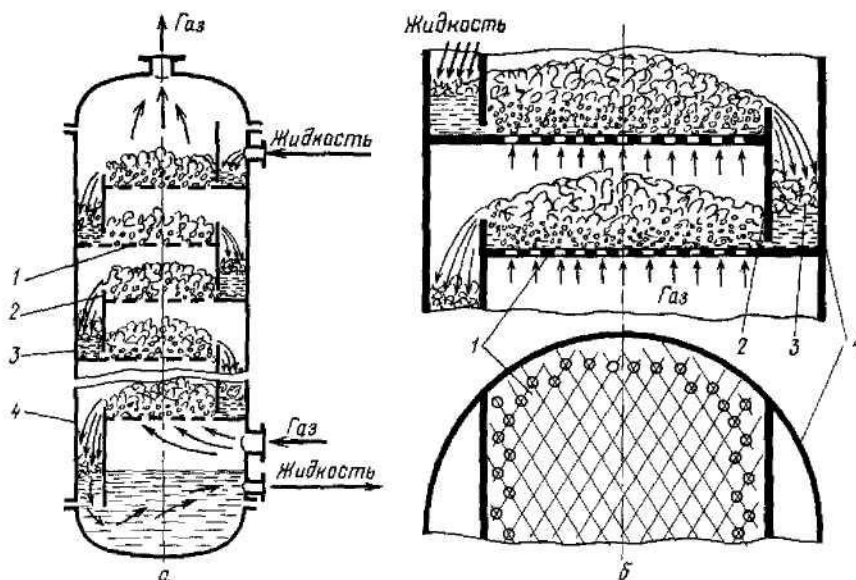


Рис. 7.9. Пристрій колони з сітчастими переточними тарілками
 а – колона з тарілками; б – дві сусідні тарілки; 1 – тарілки; 2 – переточні перегородки або труби з порогами; 3 – гідравлічні тарілки затвори; 4 – корпус колони

При дуже низькій швидкості газу його тиск не може утримати шар рідини, відповідний висоті переливу, і рідина може просочуватися (або “провалюватися”) через отвори тарілки на нижче розташовану тарілку, що призводить до істотного зниження рушійної сили процесу абсорбції. Тому газ повинен рухатися з певною швидкістю і мати тиск, достатній для того, щоб подолати тиск шару рідини на тарілці і запобігти перетіканню рідини через отвори тарілки. Таким чином, сітчасті тарілки володіють більш вузьким діапазоном роботи в порівнянні з ковпачковими.

До переваг сітчастих тарілок відносяться простота будови, легкість монтажу і ремонту, порівняно низький гідравлічний опір, достатньо висока ефективність. Проте ці тарілки чутливі до забруднень і осаду, які забивають їх отвори. Якщо відбувається раптове припинення подачі газу або істотне зниження його тиску, то з сітчастих тарілок зливається вся рідина, і для відновлення нормальної роботи апарату необхідно заново запускати колону.

Клапанні тарілки. Принцип дії цих тарілок (рис. 7.10, а) полягає в тому, що клапан 2, вільно лежачий над отвором в тарілці 1, із зміною витрати газу збільшує підйом і відповідно площу зазору між клапаном і площиною тарілки для проходу газу. Тому швидкість газу в цьому зазорі, а значить і у вході в шар рідини на тарілці, залишається приблизно постійною, що забезпечує незмінно ефективну роботу тарілки. Гідравлічний опір тарілки при цьому збільшується несуттєво. Висота підйому клапана визначається висотою обмежувача 7 (рис. 7.10, б). Діаметр отворів під клапаном складає 35...40 мм, а діаметр самого клапана 40...50 мм.

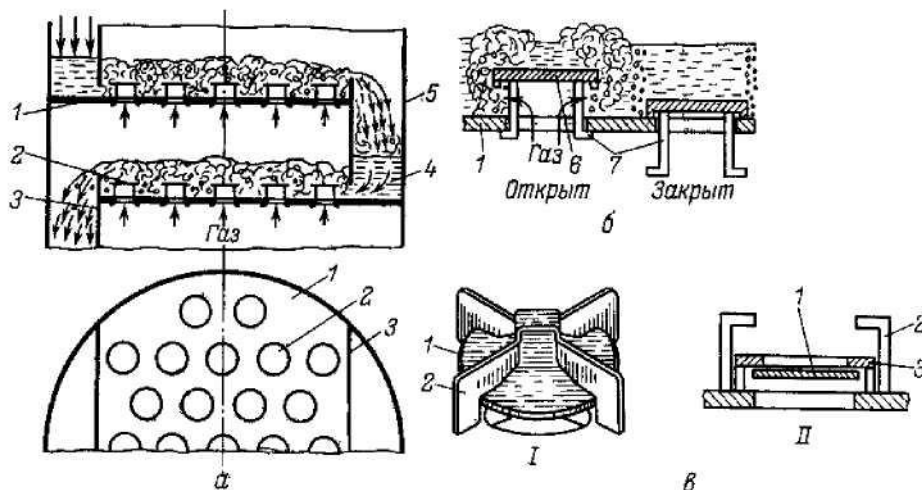


Рис. 7.10. Будова клапанних тарілок

a – дві сусідні тарілки з круглими клапанами; *б* – принцип роботи клапана (1 – тарілка; 2 – клапан; 3 – переточна перегородка з порогом; 4 – гідравлічний затвор; 5 – корпус колони; 6 – диск клапана; 7 – обмежувачі підйому клапана); *в* – круглі клапани з верхнім обмежувачем I і з баластом II (1 – дисковий клапан; 2 – обмежувач; 3 – баласт)

Колони з тарілками без зливних пристроїв. У тарілці без зливних пристроїв (рис. 7.11) газ і рідина проходять через одні і ті ж отвори або щілини. При цьому одночасно із взаємодією фаз на тарілці відбувається стік рідини на розташовану нижче тарілку – “провалення” рідини. Тому тарілки такого типу часто називають провальними. Конструкції (типи) провальних тарілок представлені на рис. 7.12.

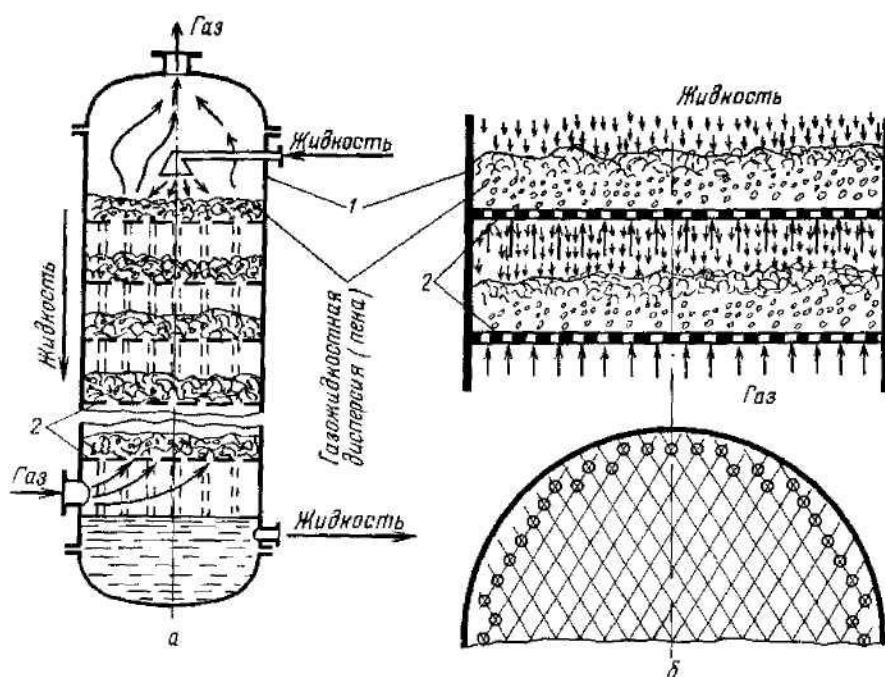


Рис. 7.11. Пристрій колони і провальних тарілок

a – колони з провальними тарілками; *б* – дві сусідні дірчасті провальні тарілки (1 – колони; 2 – тарілки)

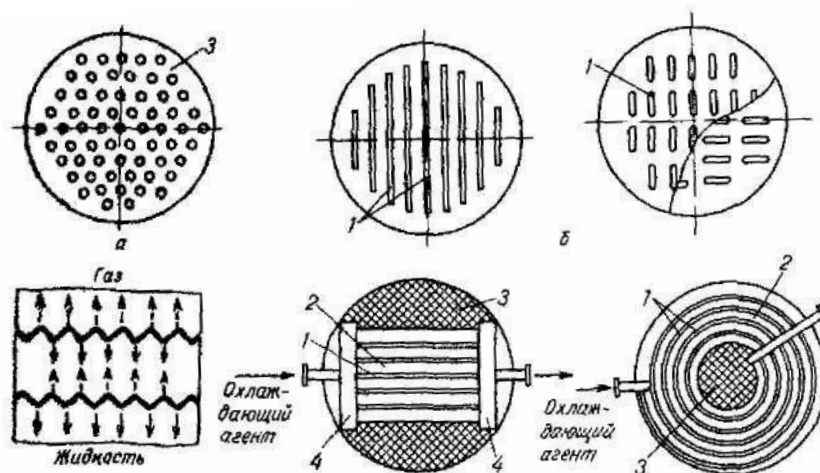


Рис. 7.12. Типи провальних тарілок

а – дірчаста (у плані); *б* – решітчаста (у плані); *в* – хвиляста (у повздовжньому перетині); *г* – трубчаста (у плані) (1 – листи; 2 – труби; 3 – перфорований лист; 4 – колектори)

Гідродинамічні режими роботи провальних тарілок специфічні тим, що нормальна їх робота можлива тільки після досягнення певної швидкості газу.

Діаметр отворів в цих тарілках зазвичай 10 мм, іноді до 15...20 мм, що дозволяє істотно збільшити навантаження по рідині і газу при незначному гідравлічному опорі. Сумарна площа вільного перетину 10...15 %.

Решітчасті тарілки мають, як правило, виштамповані щілини шириною 3...8 мм (див. рис. 7.12, б).

Хвилясті тарілки виготовляють гофрируванням металевих листів з отворами (див. рис. 7.12, в). У цих тарілках злив рідини в основному відбувається через отвори в нижніх вигинах тарілки, а газ проходить в основному через її верхні вигини. Така будова провальних тарілок збільшує інтервал їх стійкої роботи, проте вони складніші у виготовленні і монтажі, аніж дірчасті і решітчасті тарілки.

Трубчасті тарілки зазвичай виготовляють у вигляді решітки з ряду паралельних труб (див. рис. 7.12, г), приєднаних до колектора. Ці тарілки доцільно застосовувати при потребі підведення теплоти до рідини або її відведення. До недоліків трубчастих тарілок слід віднести складність виготовлення і монтажу, велику витрату металу.

Оскільки, прості за будовою і монтажем, дірчасті і решітчасті тарілки володіють низьким гідравлічним опором і іншими перевагами, то вони ширше застосовуються в промисловості в порівнянні з іншими провальними тарілками.

За ступенем очистки викидів від газоподібних забруднювачів всі конструкції тарілок приблизно рівнозначні.

Тарілчасті колони мають стандартизований ряд діаметрів від 400 до 4000 мм.

7.2.3. Розпилюючі абсорбери

У розпилюючих абсорберах контакт між фазами досягається розпилюванням або розбризкуванням рідини в газовому потоці. Ці абсорбери підрозділяють на такі групи:

1) форсуночні розпилюючі абсорбери, в яких рідина розпилюється на краплі

форсунками;

2) швидкісні проточні розпилюючі абсорбери, в яких розпилювання рідини здійснюється за рахунок кінетичної енергії газового потоку;

3) механічні розпилюючі абсорбери, в яких рідина розпилюється деталями, що обертаються.

Форсуночні розпилюючі абсорбери. Порожністими розпилюючими абсорберами (рис. 7.13) є порожністі колони. У цих абсорберах газ рухається від низу до верху, а рідина подається через розташовані у верхній частині колони 1 форсунки 2 з напрямом факела розпилювання зазвичай зверху вниз. Ефективність таких абсорберів невисока, що обумовлене перемішуванням газу по висоті колони і “поганим” заповненням її перерізу факелом розпорошеної рідини. В результаті об’ємний коефіцієнт масообміну і число одиниць перенесення в цих апаратах невеликі. Тому розпилюючі форсунки в порожністих абсорберах часто встановлюють на декількох рівнях.

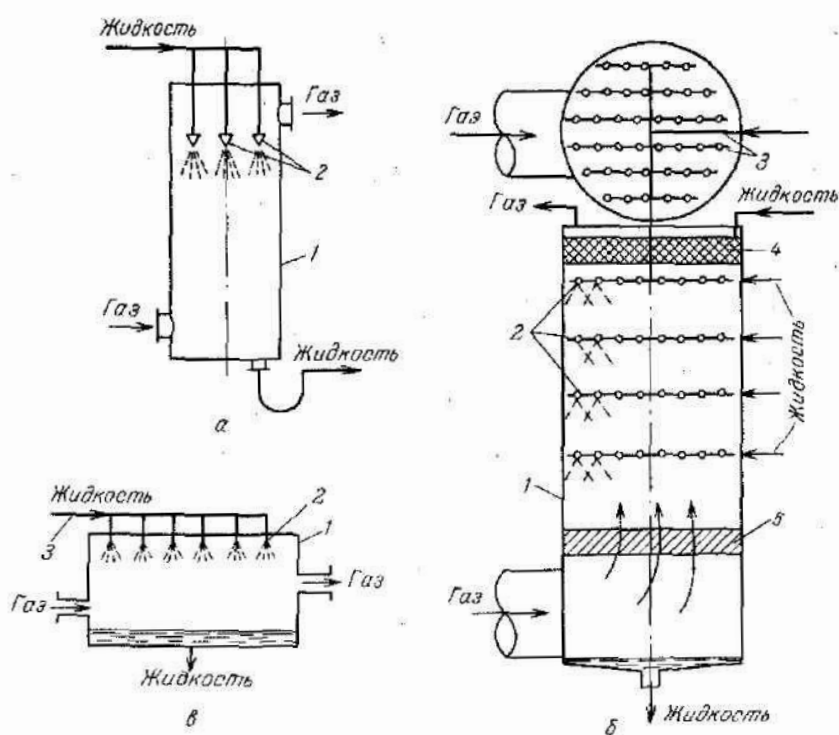


Рис. 7.13. Будова порожністих розпилюючих абсорберів

а – вертикального з верхнім розпилюванням рідини; б – вертикального з розпилюванням рідини по висоті апарату; в – горизонтального з перехресним потоком (1 – корпус; 2 – форсуночний колектор зрошувальної рідини; 4 – бризковідбійник; 5 – газорозподільник)

Порожністі розпилюючі абсорбери відрізняються простотою будови, низькою вартістю, малим гідравлічним опором, їх можна застосовувати для обробки сильно забруднених газів.

До недоліків порожністих розпилюючих абсорберів, крім їх низької ефективності, відносяться також низькі швидкості газу (до 1 м/с) щоб уникнути

винесення, незадовільна їх робота при малій щільності зрошування, достатньо висока витрата енергії на розпилювання рідини. Розпилюючі порожнисті абсорбери доцільно застосовувати для уловлювання добре розчинних газів.

Швидкісні прямооточні розпилюючі абсорбери. Дана група абсорберів відрізняється тим, що у разі прямооточного процес можна проводити при високих швидкостях газу (до 20...30 м/с і вище), причому вся рідина виноситься з газом і відділяється від нього в просторі сепарації. До цього типу апаратів відноситься абсорбер Вентурі (рис. 7.14), основною частиною якого є труба Вентурі. Рідина надходить в конфузори 1, тече у вигляді плівки і в горловині 2 розпилюється газовим потоком. Потім рідина газовим потоком виноситься в дифузори 3, в якому швидкість газу знижується і його кінетична енергія переходить в енергію тиску з мінімальними втратами. Відокремлення крапель від газу відбувається в сепараторі 4.

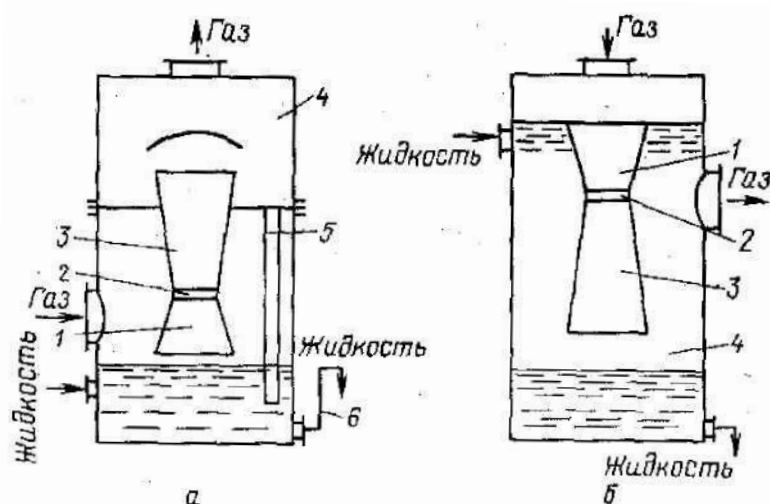


Рис. 7.14. Будова безфорсуночного абсорбера Вентурі

a – з ежекцією рідини; *б* – з плівковим зрошуванням (1 – конфузори; 2 – горловина; 3 – дифузори; 4 – сепаратори; 5 – циркуляційна труба; 6 – гідравлічний затвор)

Механічні розпилюючі абсорбери. У цих абсорберах розбризкування рідини проводиться за допомогою обертових пристроїв, тобто з підведенням зовнішньої енергії для розвитку поверхні фазового контакту. На рис. 7.15 зображено такий абсорбер, в якому розбризкування рідини здійснюється за допомогою лопатей (рис. 7.15, *a*) або дисків (рис. 7.15, *б*), закріплених на горизонтальних валах 1. Розбризкуючі елементи 2 встановлюють так, що газ рухається перпендикулярно або паралельно осям їх валів.

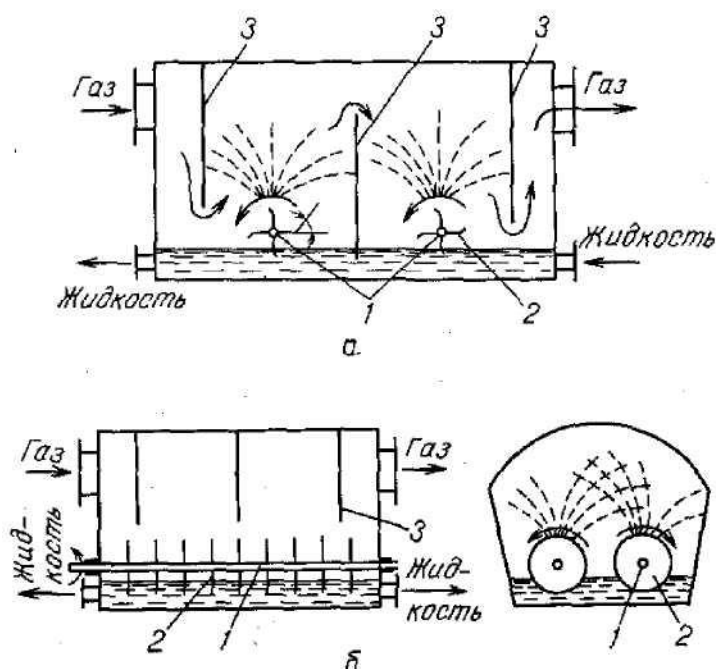


Рис. 7.15. Механічні розпилюючі абсорбери

a – з розбризкуванням рідини валиками лопатевого типу; *б* – з розбризкуванням рідини дисками (1 – вали; 2 – розбризкувачі; 3 – перегородки)

В порівнянні з абсорберами інших типів механічні абсорбери компактніші і ефективніші, але вони значно складніше за конструкцією і вимагають великих затрат енергії для проведення процесу. Тому механічні розпилюючі абсорбери доцільно застосовувати в тих випадках, коли розпилювання за допомогою форсунок або газом, що взаємодіє з рідиною, за якихось причин є неможливим.

7.3. Розрахунок абсорбційних і хемосорбційних апаратів

Розрахунок абсорбційних апаратів. Атмосферні забруднювачі у відхідних газах присутні в основному в низьких концентраціях. У зв'язку з цим при проектуванні абсорберів перш за все враховують необхідність обробки газових потоків із низькою концентрацією домішок і той факт, що при цьому утворюються рідкі потоки з низькими концентраціями речовин. Розрахункові формули для цього випадку дуже прості. Ефектами, пов'язаними з теплотою розчинення, можна нехтувати; крім того, апарат практично працює в ізотермічному режимі, що ще більш спрощує проектування. Основні складності пов'язані з тим, що потрібно обробляти дуже великі кількості газу.

Газові і рідинні потоки в абсорберах слабokonцентровані, що дозволяє ввести ряд спрощень: використовують модель ідеального розчину, яка підкоряється законам Генрі і Рауля; нехтують неізотермічністю процесу, теплотою фазових переходів розчинення і хімічних реакцій, рядом інших факторів.

Розрахунки апаратів абсорбції спрощують не лише через низькі концентрації речовин, що поглинаються. Безліч спрощень вводиться на тій підставі, що вони зменшують обсяги розрахунків без помітного зниження точності результату.

Відповідно до цього поглинач розглядають як індивідуальну речовину, а багатокомпонентні газові суміші – як бінарні, такі, що складаються з одного вловлюваного і одного інертного компоненту.

Розрахунок хемосорбційних апаратів. Абсорбери для процесів хемосорбції розраховують тими ж методами, що і для процесів фізичної абсорбції. Їх розрахунки носять характер оцінювання і можуть виконуватися різними способами. Найбільш простим і зручним на практиці є наступний підхід. Припускається, що рушійна сила процесу хемосорбції рівна рушійній силі фізичної абсорбції, а прискорення процесу масообміну хімічною реакцією враховується поправкою на коефіцієнт масовіддачі в рідкій фазі. Величини поправок для хімічних реакцій називають коефіцієнтами прискорення. Дані коефіцієнти визначаються дослідним шляхом для конкретних процесів. Це дозволяє врахувати вплив усіх факторів на параметри хемосорбційного процесу і відмінності від процесу фізичної сорбції. Тому розрахунок апарату хемосорбції виконується як для звичайного абсорбера.

Розрахунок основних розмірів апаратів для фізичної і фізико-хімічної очистки виконують у декілька етапів:

На першому етапі проводять матеріальні і енергетичні розрахунки і встановлюють умови рівноваги, будують лінію рівноваги і робочу лінію, знаходять число теоретичних ступенів зміни концентрації, визначають необхідність циркуляції розчину, витрату енергії на циркуляцію, встановлюють необхідний ступінь регенерації розчину, витрати енергії на регенерацію і втрати розчину при регенерації.

На другому етапі вибирають конструкції апаратів, розраховують масо- і теплообмін, гідродинаміку і габарити апаратів.

На третьому етапі уточнюють технологічні параметри і здійснюють оптимізацію процесу.

При проектуванні абсорбера необхідно визначити: діаметр апарату і його висоту, розміри внутрішніх частин (розміри і тип насадки, конструкцію тарілок, число тарілок, пристрої для введення і розподілу рідини), оптимальну швидкість рідини в абсорбері.

Діаметр колони визначається об'ємною витратою і режимом руху суцільної фази:

$$D_k = \sqrt{\frac{V_c}{0,785 \cdot w_c}}$$

де $V_c = G_c / \rho_c$ – об'ємна витрата суцільної фази;

G_c, ρ_c – масова витрата і густина суцільної фази відповідно;

w_c – швидкість руху суцільної фази в колоні.

Швидкість руху суцільної фази w_c залежить від режиму роботи і конструктивних особливостей масообмінного апарату. Висоту масообмінної частини апарату з концентрацією речовини, що безперервно змінюється по його висоті, можна розрахувати:

1) за основним рівнянням масопередачі:

$$H = \frac{M}{K_x a S \Delta x_{cp} \tau} = \frac{M}{K_y a S \Delta y_{cp} \tau};$$

2) за числом одиниць переносу (N_{ox} або N_{oy}) і висотою одиниць переносу (h_{ox} або h_{oy}):

$$H = N_{ox} h_{ox} = N_{oy} h_{oy};$$

3) за числом теоретичних ступенів зміни концентрації (числом теоретичних тарілок) N_m і висотою масообмінної частини апарату, еквівалентної одній теоретичній тарілці $h_{екв}$

$$H = N_{ox} h_{екв}$$

Теоретичною тарілкою називають одноразовий контакт взаємодіючих потоків, що завершується досягненням фазової рівноваги.

Висоту масообмінної частини апарату із ступінчастою зміною концентрації речовин, що беруть участь в процесі масообміну, можна розрахувати за числом дійсних ступенів зміни концентрацій (числом дійсних тарілок) N_o і відстані між тарілками h :

$$H = N_o h$$

Відстань між тарілками h приймають або розраховують відповідно до конкретного процесу масообміну і типу конкретного контактного пристрою.

Загальна висота колонного апарату складає

$$H_k = H_g + H + H_n$$

де H_g – відстань від верхнього ряду контактних елементів до кришки колони, м;

H_n – відстань від нижнього ряду контактних елементів до днища колони, м.

Відстань H_n зазвичай визначається мінімальним об'ємом рідини, необхідним для забезпечення стабільності процесу пароутворення і рівномірного розподілу газу (пара) по поперечному перерізу колони. Цю відстань приймають рівною $(1,0 \dots 1,5) \cdot D_k$.

Відстань H_g залежить від розмірів розподільного пристрою для зрошування колони рідиною і від висоти простору сепарації, в якому встановлюють відбійні пристрої для запобігання виносу бризків з колони.

В залежності від діаметра колонни D_k можна рекомендувати такі висоти верхньої H_g і нижньої H_n частин колони:

D_k , м	0,4...1,0	1,2...2,2	2,4 і більше
H_g , м	0,6	1,0	1,4
H_n , м	1,5	2,0	2,5

7.3.1. Розрахунок насадочних абсорберів

Метою розрахунку є визначення діаметру і висоти колони, гідравлічного опору насадки. Гідродинамічний розрахунок виконується на основі результатів технологічного розрахунку.

Діаметр колони визначається методом наближення: попередній розрахунок – виходячи з виду процесу і геометричного фактору насадки; остаточний – з урахуванням типу і матеріалу насадки.

Попередній розрахунковий діаметр колони D визначається залежно від значення допустимої швидкості суцільної фази w_o (газу, пари або рідини), розрахованої на повний переріз колони:

$$D = \left(\frac{V_o}{0,785 \cdot w_o} \right)^{0,5}$$

де V_o – витрати суцільної фази (газу), м³/с.

В свою чергу, допустима швидкість газу w_d функцією швидкості захлинання w_3 :

$$w_d = 0,8 \cdot w_3$$

Швидкість газу (пари) в перерізі колони, що відповідає захлинанню колони, з урахуванням виду процесу і геометричного фактору насадки визначається відповідно до рівняння:

$$\lg \left(\frac{w_3^2}{g} \cdot \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_y}{\rho_x} \cdot \mu_x^{0,16} \right) = b - c \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_y}{\rho_x} \right)^{0,125}$$

Для процесів абсорбції і десорбції $b = 0,022$; $c = 1,62$; для процесу ректифікації $b = -0,125$; $c = 1,75$. Значення коефіцієнтів b і c для деяких видів насадок приведені в додатку.

Швидкість захлинання для насадки із сідел “Інталокс” можна розрахувати також за рівнянням:

$$w_3 = K_1 \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_y} \right)^{0,5} \cdot [11 - K_2 \cdot f_1(\mu_x) \cdot L^{0,5}]$$

$$f_1(\mu_x) = 0,775 + 0,225 \mu_x^{0,25}$$

У цьому рівнянні поправка на в'язкість враховується при $\mu_x > 1$ мПа·с. Значення коефіцієнтів K_1 і K_2 наведені в табл. 7.4.

Таблиця 7.4

Значення коефіцієнтів K_1 - K_6

Вид насадки	Розмір, м	K_1	K_2	K_3	$K_4 \cdot 10^{-8}$	K_5	K_6
Кільця з кераміки, фарфору, напівфарфору	0,015	0,050	0,110	45,5	1460	0,3	0,115
	0,025	0,062	0,095	44,4	1400	0,3	0,1
	0,035	0,074	0,083	16,7	1300	0,3	0,09
	0,050	0,083	0,077	15,5	955	0,3	0,08
Кільця з прорізами: з металу	0,025	0,100	0,071	12,9	1260	0,6	0,1
	0,035	0,107	0,064	9,9	1140	0,55	0,09
	0,050	0,113	0,058	7,1	1025	0,45	0,08
	0,050	0,113	0,062	7,1	650	0,3	0,08
Сідловидна насадка: з кераміки	0,035	0,083	0,070	7,8	730	0,35	0,09
	0,050	0,093	0,065	7,1	650	0,3	0,08

Швидкість захлинання для сідловидної насадки розміром 0,05 м (система газ - рідина) можна розрахувати за рівнянням:

$$\lg \left(\frac{w_3^2}{g} \cdot \frac{a}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_y}{\rho_x} \cdot \mu_x^{0,16} \right) = b - c \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_y}{\rho_x} \right)^{0,125}$$

при значенні коефіцієнтів $b = -0,099$, $c = 1,505$; робоча швидкість $w_d = 0,7 \cdot w_3$.

Швидкість захлинання для кілець Паля знаходять за співвідношенням:

$$w_3 = \left(\frac{V_0}{0,785 \cdot D_p^2} \right)$$

$$D_p = 0,339 \cdot \left[37 \cdot \frac{G}{A_0} \left(\frac{\rho_y}{\rho_x - \rho_y} \right)^{0,5} - 510 \cdot L \cdot \lg A_1 \right]^{0,5}$$

де A_0 і A_1 – коефіцієнти, які визначаються за графіками на рис. 7.16 і 7.17.

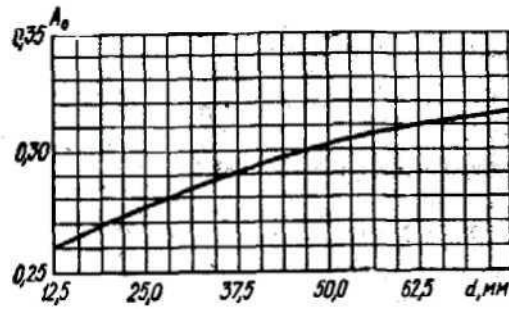


Рис. 7.16. Графік для визначення коефіцієнта A_0 (насадка – металеві кільця Паля)

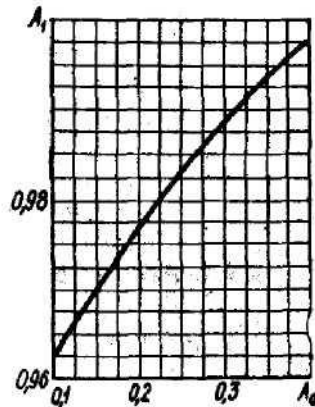


Рис. 7.17. Графік для визначення коефіцієнта A_1

Характеристики основних типів насадок наведені в додатку .

З урахуванням коефіцієнта можливого збільшення продуктивності K_7 , попередній розрахунковий діаметр колони складе:

$$D = \frac{V_0 \cdot K_7}{0,785 \cdot w_0}.$$

З двох заздалегідь розрахованих величин D для верхньої і нижньої частин колони вибирають найбільшу величину D_{max} . Із стандартного ряду діаметрів приймають найближчий (вищий за значенням) до D_{max} , що є попереднім діаметром колони D_{non} .

Дійсний розрахунковий діаметр колони D_p визначають за розрахунковою швидкістю w_p , яка є функцією максимально допустимої швидкості $w_{0,max}$,

$$D_p = \left(\frac{V_0 \cdot K_7}{0,785 \cdot w_p} \right)^{0,5},$$

де $w_p = 0,8 \cdot w_{0,max}$;

$$w_{0,max} = K_1 \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_y} \right)^{0,5} \cdot (1 - K_2 \cdot A \cdot 60 \cdot L_{non}^{0,5}).$$

Значення коефіцієнтів K_1 і K_2 приймають за табл. 7.4. Величина $A = f(\mu_x)$. Попередня об'ємна швидкість рідини:

$$L_{non} = \frac{L_y}{f_{non}},$$

де $f_{non} = 0,785 \cdot D_{non}^2$.

Відповідно до вищого розрахункового значення D_p для нижньої і верхньої

частин колони приймають для проектування діаметр колони D_k із стандартного ряду діаметрів.

Якщо $D_p > 2,8$ м, розрахунок припиняють, оскільки стандартної насадочної колони такого діаметру немає.

Для колони, прийнятої до проектування:

- вільний перетин колони $f_k = 0,785 \cdot D_k^2$;
- об'ємна швидкість рідини $L_V = L/f_k$;
- швидкість газу в колоні $w = V/f_k$;
- чинник навантаження по газу $F = w(\rho_y)^{0,5}$.

Висоту шару насадки визначають за рівнянням:

$$H = N_T \cdot h_{екв},$$

де N_T – число теоретичних тарілок;

$h_{екв}$ – висота насадки, еквівалентна одній теоретичній тарілці.

Висоту насадки з кілець Рашига, еквівалентну одній теоретичній тарілці, можна розрахувати за рівнянням:

$$\frac{h_{екв}}{d_{екв}} = 5,2 \cdot \text{Re}_y^{0,2} \left(\frac{G}{L} \right)^{0,35} \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_y} \right)^{0,8} \cdot \frac{\lg \frac{L}{m \cdot G}}{1 - \frac{m \cdot G}{L}},$$

де $d_{екв} = 4\epsilon/a$ – еквівалентний діаметр насадки;

m – тангенс кута нахилу ділянки лінії рівноваги.

Для нерегулярної насадки $h_{екв}$ орієнтовно можна розрахувати відповідно до рівності:

$$h_{екв} = \left[\frac{K_5}{w} \cdot \sqrt{\frac{\rho_x}{\rho_y}} \cdot \frac{1}{1 + D_k} \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{h}} \cdot (1 - 60 \cdot K_6 \sqrt{L_V}) \cdot f\left(\frac{d}{D_k}\right) \right]^{-1}.$$

Коефіцієнти K_5 і K_6 підбирають по табл. 7.4.

Величину $f(d/D_k)$ наближено визначають за рис. 7.18 або розраховують за рівнянням:

$$f\left(\frac{d}{D_k}\right) = 0,62 \left(\frac{d}{D_k} \right)^{-0,15}.$$

Якщо $d/D_k \leq 0,043$, приймають $f(d/D_k) = 1$.

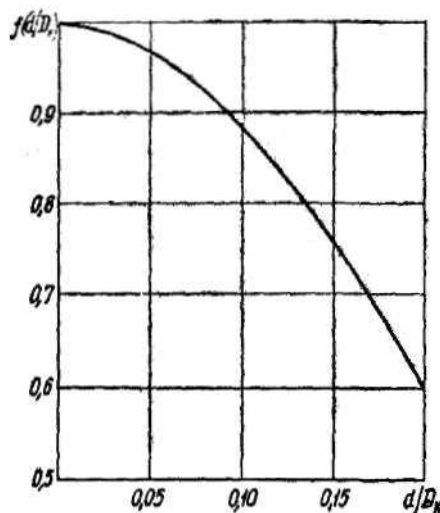


Рис. 7.18. Залежність функції $f(d/D_k)$ від співвідношення d/D_k

Гідравлічний опір насадки для систем газ - рідина і пара - рідина в точці інверсії можна розрахувати за рівнянням:

$$\left(\frac{\Delta P_u}{H}\right)_{зр} = \left(\frac{\Delta P}{H}\right)_{сух} \cdot \left[1 + A \left(\frac{L}{G}\right)^m \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_y}\right)^n \cdot \left(\frac{\mu_x}{\mu_y}\right)^c\right],$$

де $\left(\frac{\Delta P_u}{H}\right)_{зр}$ – опір насадки за наявності зрошування в точці інверсії для такої ж швидкості газу, як і при сухій насадці (на 1 м її висоти);
 L/G – відношення масових витрат рідини і газу (пари);
 $\left(\frac{\Delta P_u}{H}\right)_{сух}$ – опір сухої насадки (на 1 м її висоти).

Значення A , m , n і c приведені в табл. 7.5.

Таблиця 7.5

Значення коефіцієнтів A , m , n і c

Система	A	m	n	c
Газ - рідина при $\left(\frac{L}{G}\right)^{1,8} \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_y}\right) \cdot \left(\frac{\mu_x}{\mu_y}\right)^{0,2} < 0,5$	8,4	0,405	0,225	0,045
Газ - рідина при $\left(\frac{L}{G}\right)^{1,8} \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_y}\right) \cdot \left(\frac{\mu_x}{\mu_y}\right)^{0,2} > 0,5$	10	0,945	0,525	0,105
Пара - рідина при $\left(\frac{L}{G}\right)^{1,8} \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_y}\right) \cdot \left(\frac{\mu_x}{\mu_y}\right)^{0,2} < 0,5$	0,352	0,342	0,190	0,038

Гідравлічний опір шару сухої насадки:

$$\Delta P_{сух} = \lambda \cdot \frac{H}{d_{екв}} \cdot \frac{\rho_y \cdot w_p^2}{2} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{H \cdot a}{\varepsilon^3} \cdot \frac{w_\phi^2 \cdot \rho_y}{2};$$

еквівалентний діаметр:

$$d_{екв} = 4 \cdot R_c = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a};$$

робоча (дійсна) швидкість:

$$w_p = \frac{w_\phi}{\varepsilon},$$

де H – висота шаруючи насадки, м;

λ – коефіцієнт опору насадки;

w_ϕ – фіктивна швидкість газу, віднесена до повного перерізу незаповненого скрубера, м/с;

a – питома поверхня насадки, м²/м³;

ε – вільний об'єм насадки, м³/м³;

R_c – гідравлічний радіус насадки, м.

Коефіцієнт опору насадки λ є функцією критерію Re_y для газового (парового) потоку:

$$Re_y = \frac{w_p \cdot d_{екв} \cdot \rho_y}{\mu_y} = \frac{4 \cdot w_\phi \cdot \rho_y}{\mu_y \cdot a}$$

і λ можна визначити за такими співвідношеннями:

$$\text{при } Re_y < 80 \quad \lambda = \frac{400}{Re_y^{0,85}};$$

$$\text{при } 80 < Re_y < 400 \quad \lambda = \frac{70}{Re_y^{0,45}};$$

$$\text{при } 400 < Re_y \quad \lambda = \frac{16,5}{Re_y^{0,2}}.$$

Гідравлічний опір в режимі емульгування вище точки інверсії:

$$\Delta P_e = \Delta P_u + \rho_e \cdot g \cdot H;$$

$$\rho_e = \rho_y + 0,43 \cdot (\rho_x - \rho_y) \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{0,325} \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_y}\right)^{0,18} \cdot \left(\frac{\mu_x}{\mu_y}\right)^{0,0362},$$

де ρ_e – густина газорідинної або парорідинної емульсії.

Висота переливної труби в насадочній колоні, що забезпечує роботу в режимі емульгування, дорівнюватиме

$$h_n = \frac{\Delta P_u + \rho_e \cdot g \cdot H}{\rho_x \cdot g}$$

де H – загальна висота рідини в колоні.

Опір зрошуваної нерегулярної насадки загального призначення на 1 м висоти шару можна розрахувати за рівнянням:

$$\Delta P_1 = K_3 \cdot \rho_z \cdot w^2 \cdot H \cdot 10^{K_4 \cdot L \cdot 3600}.$$

Коефіцієнти K_3 і K_4 підбирають за табл. 7.4.

Загальний гідравлічний опір шару насадки обчислюють за формулою:

$$\Delta P_{nac} = \Delta P_1 \cdot H;$$

тиск в нижній частині колоні:

$$P_n = P_g + \Delta P_{nac},$$

де P_g – тиск у верхній частині колоні.

7.3.2. Розрахунок тарілчастих абсорберів

Розрахунки тарілчастих абсорберів можуть виконуватися в наступному порядку:

- визначають склад і витрату відхідних газів, складають матеріальний баланс;
- будують рівноважну і робочу лінії процесу, визначають витрату поглинальної рідини;
- визначають рушійну силу процесу.
- визначають оптимальну швидкість газового потоку;
- визначають коефіцієнти масовіддачі;
- визначають коефіцієнт масопередачі;
- визначають сумарну поверхню і число тарілок;
- визначають гідравлічний опір тарілок.

Вид рівняння для знаходження оптимальної швидкості газового потоку залежить від типу тарілки, конструкцію якої підбирають виходячи з техніко-економічних і інших міркувань.

Мінімальна швидкість, при якій забезпечується робота сітчастої тарілки на всій її площі і гідравлічний опір, визначається за формулами:

$$w_{\min} = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{2 \cdot g \cdot \Delta P_p}{\zeta \cdot \rho_z} \right),$$

$$\Delta P_p = \left[z_1 \cdot (1-k) + 10^3 \cdot (1+k) \cdot \left(\frac{l}{m} \right)^{2/3} \right] \cdot \rho_p,$$

де ΔP_p – зниження рівня при нерівномірній роботі;

ζ – коефіцієнт опору сухої тарілки;

ρ_z, ρ_p – щільність газу і рідини, кг/м³;

z_1 – висота зливної перегородки, мм;

l – інтенсивність зрошування, м³/(м·год);

m – коефіцієнт витрати зливної перегородки (від 6400 до 10000);

k – мінімальна питома густина піни.

Швидкість газу, що відповідає верхній межі роботи провальних тарілок, можна визначити за формулою:

$$\frac{w^3}{F_c} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_p} \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_g} \right)^{1/2} = 11,6 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{-0,228},$$

де ρ_g – густина води, кг/м³;

F_c – вільний перетин тарілок, м/м².

Поверхню контакту фаз для провальних і перехресних тарілок визначають за формулою:

$$A = \frac{c \cdot \varphi_z^q}{1 - \varphi_z} \cdot \left(\frac{w_k \cdot h_0}{\nu_p} \right)^n \cdot \left(\frac{w_k^2}{g \cdot h_0} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_p \cdot h_0^2} \right)^{-0,6} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_g} \right)^a,$$

де c – коефіцієнт пропорційності: для провальних тарілок $c = 5$ (при $h_0 > 2 \cdot 10^{-2}$ м) і $c = 250 \cdot h_0$ (при $h_0 \leq 2 \cdot 10^{-2}$ м), для сітчастих тарілок $c = 0,65$, для клапанних $c = 0,32$; для ковпачкових $c = 0,6$;

φ_z – газоутримання пінного шару;

ν_p – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с.

Значення показників ступенів q , n і z приведені в табл. 7.6.

Таблиця 7.6

Значення показників ступенів q , n і z

Система	Q	n	z	
			при $\mu_p < 1$ сП	при $\mu_p > 1$ сП
Провальні тарілки				
Газ-вода-водні розчини електролітів	0	-0,25	0	-0,25
Газ-органічні рідини	0	-0,25	-0,43	-0,25
Перехресні тарілки				
Газ-вода-водні розчини	0,3	0	0,25	0
Газ-органічні рідини	0,3	0	-0,18	0

Коефіцієнти масовіддачі, віднесені до фактичної поверхні контакту фаз, розраховують відповідно до рівностей:

$$Nu_z = 0,12 \cdot Re_z^{0,7} \cdot Pr_z^{0,5} \cdot \left(\frac{d_n}{d_{cm}} \right)^{0,5},$$

$$Nu_p = 1,2 \cdot Re_p^{0,7} \cdot Pr_p^{0,5} \cdot \left(\frac{d_n}{d_{cm}} \right)^{0,5},$$

де $Nu_z = \frac{\beta_z \cdot d_n}{D_z}$ – дифузійний критерій Нуссельта для газу;

$Re_z = \frac{w_k \cdot d_n}{\varphi_z \cdot \nu_z}$ – критерій Рейнольдса для газу;

$Pr = c_z \cdot \mu$ – дифузійний критерій Прандтля для газу;

c_z – питома теплоємність газу ;

$Nu_p = \frac{\beta_p \cdot d_n}{D_p}$ – дифузійний критерій Нуссельта для рідини;

$Re_p = \frac{w_p \cdot d_n}{(1 - \varphi_z) \cdot \nu_p}$ – критерій Рейнольдса для рідини, де w_k – швидкість газу, м/с;

$Pr = c_p \cdot \mu$ – дифузійний критерій Прандтля для рідини;

c_p – питома теплоємність рідини;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості.

Коефіцієнти дифузії для деяких газів наведені в додатку . Для інших газів при розрахунку коефіцієнтів дифузії можна використовувати значення атомних і молярних об'ємів речовин (додаток), а також коефіцієнти, наведені в додатку .

Величина газотримування φ_z визначається за формулою:

$$\varphi_z = 0,6 \cdot \left(\frac{w_k^2 \cdot h_0}{q} \right)^{0,1}.$$

Поверхнево-об'ємний діаметр бульбашок газу рівний:

$$d_n = \frac{6 \cdot \varphi_z}{a} = \frac{6 \cdot \varphi_z \cdot h_0}{(1 - \varphi_z) \cdot A},$$

де a – питома поверхня контакту фаз, м²/м³.

Якщо робоча лінія і лінія рівноваги прямі, а рух газу і рідини протиточні, то розрахунок числа тарілок в абсорбері проводять наступним чином:

- визначають рушійні сили на початку і кінці процесу;
- визначають середню рушійну силу;
- з матеріального балансу знаходять кількість абсорбенту;
- визначають коефіцієнти β_z , β_p і K_z ;
- обчислюють поверхню контакту фаз для однієї тарілки;
- визначають загальну поверхню контакту фаз за рівнянням масопередачі:

$$F = \frac{M}{K_z \cdot \Delta Y_{cp}};$$

- знаходять число тарілок в колоні з рівності:

$$n = \frac{F}{F_m},$$

де F_m – площа тарілки, м².

Якщо робоча лінія являє собою пряму, а лінія рівноваги – криву, то розрахунок проводять по схемі:

- поверхню контакту фаз визначають для однієї тарілки F_m ;
- обчислюють коефіцієнти масовіддачі β_z , β_p і масопередачі K_z або K_p ;
- знаходять середню величину тангенса кута нахилу кривої рівноваги;

- розраховують число одиниць перенесення, для однієї тарілки:

$$N_{oz.m} = K_z \cdot \frac{F_m}{G}$$

або

$$N_{op.m} = K_p \cdot \frac{F_m}{L};$$

- методом графічної інтеграції визначають число одиниць перенесення для всієї колонії N_{oz} або N_{op} ;
- визначають число тарілок в колонії:

$$n = \frac{N_{oz}}{N_{oz.m}} = \frac{N_{op}}{N_{op.m}}.$$

Гідравлічний опір тарілок рівний:

$$\Delta P_m = \Delta P_{c.m} + \Delta P_\sigma + \Delta P_{z-p}.$$

Опір сухої тарілки $P_{c.m}$ знаходять по формулі:

$$\Delta P_{c.m} = \zeta \cdot \frac{\rho_z \cdot w_0^2}{2}.$$

Втрата тиску ΔP_σ на подолання сил поверхневого натягу σ рівна:

$$\Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot \sigma}{d_e},$$

де d_e – еквівалентний діаметр отвору, м.

Опір газорідного шару:

$$\Delta P_{z-p} = h_0 \cdot \rho_p,$$

де h_0 – запас рідини на тарілці, мм.

Для сітчастої тарілки ΔP_{z-p} можна визначити з виразу:

$$\Delta P_{z-p} = 1,3 \cdot \left(k \cdot z_1 + h_0 \cdot k^{1/3} \right) \cdot \rho_p.$$

Загальний опір для провальних тарілок можна розрахувати за формулами:

$$\Delta P = \frac{\zeta}{1-\beta} \cdot \frac{\rho_z}{2g} \cdot \left(\frac{w_z}{F_c} \right)^2 \cdot \frac{1}{(1-\tau)^3} \cdot [1 - \tau \cdot (1-\beta)] + \frac{2\sigma}{a} \cdot (1-\beta),$$

$$\beta = 1,11 \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_p} \right)^{0,118},$$

$$\tau = \frac{\left[\left(\frac{L}{G} \right)^2 \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \frac{1}{\zeta \cdot \mu_u^2} \right]^{1/3}}{1 + \left[\left(\frac{L}{G} \right)^2 \cdot \frac{\rho_z}{\rho_p} \cdot \frac{1}{\zeta \cdot \mu_u^2} \right]^{1/3}},$$

де ζ – коефіцієнт опору;

σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;

a – ширина щілини або радіус отвору, м;

μ_u – коефіцієнт проточності рідини з отвору ($\mu_u = 0,62$).

7.3.3. Розрахунок розпилюючих абсорберів

До апаратів цього типу відносяться порожнисті, швидкісні прямоточні і

механічні абсорбери.

У порожнистих абсорберах рідина розпилюється форсунками. Ефективність абсорбера залежить від кількості рідини, що розпилюється, кута конусності факела розпилювання, дисперсності крапель і розподілу їх в перетині факела.

Продуктивність форсунки визначають за формулою (в м³/с):

$$V = \xi \cdot f \cdot \left(\frac{2P}{\rho_p} \right)^{1/2},$$

де P – тиск рідини перед форсункою, Па;

$\rho_{ж}$ – густина рідини, кг/м³;

f – площа вихідного отвору форсунки, м²;

ξ – коефіцієнт витрати рідини, рівний 0,2...0,3.

Середній розмір крапель d визначають за формулою:

$$\frac{d}{d_0} = A \cdot \left(\frac{\mu_p^2}{\rho_p \cdot \sigma \cdot d_0} \right)^{-m} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_0}{\nu_p} \right)^{-n},$$

де d_0 – діаметр вихідного отвору форсунки;

A – коефіцієнт пропорційності;

w_p – швидкість витоку рідини з форсунки.

Питома поверхня крапель рівна:

$$a = \frac{6U}{u \cdot d},$$

де U – густина зрошування, м³/(м²·с);

u – абсолютна швидкість крапель, м/с, $u = w_0 \pm w$ (w_0 – швидкість падіння краплі, м/с, w – швидкість газу, м/с).

Масовіддачу в газовій і рідкій фазах можна розрахувати за формулами:

$$Nu_z' = 2 + 0,552 \cdot Re_z^{0,5} \cdot (Pr_z')^{0,33},$$

$$Nu_p' = 1,65 \cdot \left(\frac{d}{d_0} \right)^{0,73} \cdot Re_p^{0,5} \cdot (Pr_p')^{0,33},$$

де $Nu_p' = 1,13/(F_0')^{1/2}$; $F_0' = D_p \cdot \tau / d^2$; τ – час падіння краплі.

До прямоточних розпилюючих абсорберів відносяться форсуночні і бесфорсуночні апарати Вентурі типу АРТ і ударно-розпилюючі. Гідравлічний опір абсорберів Вентурі складає суму гідравлічних опорів труби-розпилювача і краплевловлювача. Гідравлічний опір труби-розпилювача рівний:

$$\Delta P = \zeta_c \cdot \frac{w_z^2 \cdot \rho_z}{2} + \zeta_p \cdot \frac{w_p^2 \cdot \rho_p}{2} m,$$

$$\zeta_c = 0,165 + 0,034 \cdot \frac{l_z}{d_e} \cdot \left[0,06 + 0,028 \cdot \frac{l_z}{d_e} \right] \cdot \frac{w_z}{w_{ж}},$$

$$\zeta_p = A \cdot \zeta_c \cdot m^{1+B},$$

де ζ_c – коефіцієнт гідравлічного опору сухої труби-розпилювача;

$\zeta_{ж}$ – коефіцієнт гідравлічного опору при введенні рідини;

w_z – швидкість газу в горловині, м/с;

$\rho_z, \rho_{ж}$ – густина газу і рідини, кг/м³;

l_z – довжина горловини, м;

d_e – еквівалентний діаметр горловини;

w_{36} – швидкість звуку, м/с;

$w_z/w_{36} = M$ – число Маха;

A і B – коефіцієнти, що визначаються за довідниками.

Середній розмір крапель, що утворюються при розпилюванні рідини пневматичною форсункою:

$$d = \frac{585 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma^{1/2}}{w_z \cdot \rho_p^{1/2}} + 53,4 \cdot \left[\frac{\mu_p}{(\rho_p \cdot \sigma)^{1/2}} \right]^{0,45}.$$

При рівності швидкостей крапель газу питома поверхня контакту фаз рівна:

$$a = \frac{6U}{w_z \cdot d} = \frac{0,006m}{d}.$$

Коефіцієнти масовіддачі в форсуночному абсорбері можна визначити за формулами:

$$Nu_z' = 0,36 \cdot 10^{-4} \cdot Re_z^{0,81} \cdot (Pr_z')^{0,67},$$

$$Nu_p' = (0,145 - 0,0081 \cdot w_z) \cdot (Re_p - 30)^p \cdot (Pr_p')^{0,5},$$

де $Nu_r' = (\mu_{ж}/\mu_z) \cdot (\beta_{zV} R \cdot T \cdot d_0/D_z) \cdot (\sigma/g \cdot q_p)^{1/2}$;

$Nu_p = \beta_{pV} \nu_{прив} \cdot d_0 \cdot D_p$;

β_{zV} і β_{pV} – об'ємні коефіцієнти масовіддачі в газовій і рідкій фазах, 1/с;

$\nu_{прив} = (\mu^2/\rho_p^2 \cdot g)^{1/3}$ – приведена товщина плівки;

$p = 7,4 \cdot 10^{-4} \cdot w_k^{164}$;

у виразах Re_z і Re_p за лінійний розмір прийнято діаметр горловини d_0 .

Гідравлічний опір в безфорсуночних абсорберах обчислюють за формулою:

$$\Delta P = \Delta P_c + 18 \cdot w_z^{1,08} \cdot m^{0,63}.$$

Для пульсуючого режиму число одиниць перенесення рівне:

$$N_{0z} = 0,847 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,32}.$$

Для рівномірного режиму використовується інша формула:

$$N_{0z} = 0,477 \cdot w_0^{0,35} \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,44}$$

Для абсорберів типу АРТ коефіцієнт опору рівний:

$$\zeta = 1,32 \cdot (1 + a \cdot m^n),$$

число одиниць перенесення

$$N_{0z} = 0,43 + B \cdot m$$

де $a = \varphi(w_z)$ і $B = \varphi(w_z)$; для пульсуючого режиму $n = 0,68$; для рівномірного $n = 1,9$.

7.4. Десорбція забруднювачів із абсорбентів

В результаті видалення газоподібних забруднювачів шляхом абсорбції відбувається перехід цих компонентів в розчин. Щоб уникнути проблем, пов'язаних з видаленням таких розчинів, бажано їх якимось чином утилізувати. Якщо забруднююча речовина абсорбується в чистому стані (не реагуючи з іншими хімічними речовинами), її практично завжди можна отримати в концентрованій формі шляхом відгону абсорбуючої рідини. Отримана таким чином речовина в

принципі може бути використана в тому ж самому виробничому процесі або в інших процесах. Іноді в результаті переведення в іншу форму цей матеріал може слугувати вихідною сировиною для промислових підприємств або використовуватися жителями довколишніх районів. Після нейтралізації вловленої речовини можливе її осадження або концентрація в розчині, а також висушування з отриманням продукту, що має певну товарну цінність, нехай навіть достатню тільки для того, щоб покрити витрати на транспортування. Виділений сульфат і сульфід натрію (у рідкому і в твердому стані) можуть знайти застосування на паперових фабриках. В результаті їх реакції з аміаком можна одержувати добрива.

При обробці вапном або іншими реагентами забруднюючі речовини можуть бути виділені з розчину у вигляді нерозчинного осаду. Цей осад концентрують шляхом відстоювання, а потім з нього видаляють воду шляхом фільтрації або центрифугування. Проте у багатьох випадках осад після зневоднення містить не більше 30...50 % твердих речовин, що створює серйозні проблеми при їх видаленні. Скид у водойми, як правило, заборонений або важко здійснений. Для скиду відходів можна використовувати вільні земельні ділянки, однак при цьому слід враховувати можливість шкідливих наслідків для навколишнього середовища, до яких приведе такий метод в майбутньому. Крім того, після закопування осаду в ґрунт дані ділянки можуть виявитися непридатними для будівництва, оскільки опір ґрунту навантаженню знижується.

Серйозною проблемою є виділення хлоридів, нітратів і нітриту, оскільки їх осадження – дороговартісний процес. У випадку хлоридів необхідно враховувати можливість їх очистки і використання як сировини для отримання хлору. Нітриту можна окислювати в нітрати і після сконцентрування використовувати як компонент для добрив.

У випадку органічних забруднювачів найбільш ефективним є перегін і виділення речовини в концентрованому вигляді, навіть в тих випадках, коли матеріал, що виділяється, може бути використаний тільки як паливо. Якщо органічна сполука розчинна у воді і здатна піддаватися біологічному руйнуванню, то більш економнішою може стати одноразова абсорбція водою з подальшим біологічним розкладанням, особливо в тих випадках, коли розчини, що утворюються, сильно розбавлені і перегін малоефективний. Граничне значення концентрації забруднювача в оброблюваному газі, при якому доцільно переходити від перегону до біологічного руйнування, зазвичай складає $100...300 \text{ млн}^{-1}$ (за об'ємом).

Крім відгону, існують і інші методи регенерації відпрацьованого розчину абсорбції. До них відноситься обробка озоном і іншими окислювачами (H_2O_2 , HClO , KClO_4 , KMnO_4 , HNO_3 і ін.), гідроліз (можливий при високих температурах і тиску), обробка іншими реагентами, в результаті якої отримують:

- а) нетоксичні відходи;
- б) продукти, що не змішуються, які можна відокремити відстоюванням;
- в) нерозчинні осади.

Можна використовувати також адсорбцію органічних речовин глинами, деревним вугіллям, тирсою і смолами; екстракцію розчинниками; обробку твердими або рідкими іонообмінними матеріалами; охолодження абсорбційного розчину, що приводить до кристалізації забруднювача.

Для одноразової абсорбції іноді застосовують воду, однак використання для цієї мети органічних рідин можливе лише в дуже окремих, спеціальних випадках. Якщо така можливість представляється, нею нехтувати не слід. Прикладом може слугувати використання в якості абсорбента органічної сировини або паливних нафт, які після абсорбції безпосередньо прямують на переробку або на спалювання.

Розділ 8

Адсорбційна очистка газових викидів

8.1. Використання методу адсорбції для вловлювання газоподібних сполук

Фізична основа процесу адсорбції – здатність деяких твердих тіл з ультрамікроскопічною структурою (адсорбентів) вибірково відділяти та концентрувати на своїй поверхні окремі компоненти газової, пароповітряної суміші або розчину. В пористих тілах з капілярною структурою поверхнєве поглинання доповнюється капілярною конденсацією.

Адсорбція дозволяє майже повністю вилучити з газової суміші забруднюючі компоненти, дає можливість здійснювати глибоке очищення газів. Цим пояснюється все більше застосування в охороні навколишнього середовища адсорбційних методів розподілу і очищення там, де інші методи виявляються недостатньо ефективними.

Основний параметр, який характеризує процес адсорбції – адсорбційна здатність (ємність) адсорбенту стосовно компоненту, який вилучається. Адсорбційна ємність визначається відношенням ваги речовини, яка поглинута адсорбентом, до ваги адсорбенту (або площі його поверхні). Вона залежить від концентрації адсорбованої речовини біля поверхні адсорбенту, тиску, загальної площі поверхні адсорбенту, фізичних, хімічних та електричних властивостей адсорбованої речовини та адсорбенту, температурних умов та наявності домішок. Тому, адсорбенти, які використовуються в системах очищення відхідних газів, повинні задовольняти наступні вимоги: мати велику адсорбційну здатність при поглинанні компонентів у невисоких концентраціях їх в газових сумішах, володіти високою селективністю, мати високу механічну міцність, володіти здатністю до регенерації і мати низьку вартість.

На практиці знайшли застосування такі адсорбенти: активоване вугілля, силікагелі, алюмогелі і цеоліти. Характеристика і області застосування деякого активного вугілля представлені в табл. 8.1.

Таблиця 8.1

Характеристика і області застосування активного вугілля

Марка	Розмір гранул, мм	Насипна густина, кг/м ³	Час захисної дії, хв	Граничний адсорбційний об'єм мікропор, см ³ /г	Область застосування
БАУ	1-5	350	-	0,26	Адсорбція газу і пару
СКТ	1-3,5	380-500	70	0,45-0,59	Адсорбція газу і пару
АГ-3	1,5-2,7	450	38	0,3	Адсорбція газу і пару
АГ-5	1-1,5	450	45	0,3	Адсорбція газу і пару
САУ	1-5	450	-	0,36	Адсорбція газу і пару
КАУ	1-5	400	-	0,33	Адсорбція газу і пару
АР-3	1-5,5	550	-	0,33	Для рекуперації
АРТ	1-6	550-600	-	0,33	Для рекуперації
СКТ-3	1-3,5	420-450	-	0,46	Для рекуперації

Силікагелі використовують для осушення газів і поглинання пари полярних

органічних речовин (наприклад, метилового спирту). Промисловість випускає кускові і гранульовані силікагелі із зернами розміром 0,2...7 мм, насипною густиною 400...900 кг/м³. Характеристика силікагелів дана в табл. 8.2.

В порівнянні з вугіллям силікагелі, негорючі і мають низьку температуру регенерації (100...200°C), низьку вартість і відносно високу механічну міцність до стирання.

Алюмогелі (активний оксид алюмінію) використовуються для осушення газів і поглинання полярних органічних речовин з газових сумішей. Промисловість випускає гранульовані алюмогелі циліндричної форми (діаметр гранул 2,5...5,0 мм, висота 3...7 мм, насипна густина 500...700 кг/м³, середній радіус пор $6 \cdot 10^{-9}$... $6 \cdot 10^{-8}$ м), а також кулястої форми (діаметр частинок 3...4 мм, насипна густина 600...900 кг/м³, середній радіус пор $3 \cdot 10^{-9}$... $4 \cdot 10^{-9}$ м).

Цеоліти – алюмосилікати, що містять оксиди лужних і лужноземельних металів. Вони поділяються на природні і синтетичні. З природних цеолітів використовуються на практиці кліноптілоліт, морденіт, шабазит, еріоніт. Кліноптілоліт має розмір пор до $3,5 \dots 4 \cdot 10^{-10}$, а об'єм мікропор 0,15 см³/г.

Використовуються синтетичні цеоліти таких марок (перший індекс марки відповідає формі катіонів, а другий позначає тип кристалічної решітки):

Цеоліт	КА	NaA	CaA	CaX	NaX
Розмір входних отворів, м	$3 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$

Синтетичні цеоліти випускаються у вигляді гранул кулястої форми (діаметр 2...5 мм) і циліндричної форми ($d = 2 \dots 4$ мм і довжина 2...4 мм).

Цеоліт КА використовується тільки для осушення газів; цеоліт NaA адсорбує гази, критичний розмір молекул яких не перевищує $4 \dots 10^{-10}$ м (сірководень, сірковуглець, аміак, етан, пропілен, метан, оксид вуглецю і ін.), цеоліт CaA поглинає вуглеводні і спирти тільки нормальної будови. Цеоліти CaX і NaX мають великі входні отвори і сорбують всі молекули, адсорбовані цеолітами NaA і CaA, а також нафтеніві і ароматичні вуглеводні, органічні сірчисті, азотисті і кисневі сполуки, галогенозаміщені вуглеводні з відкритим ланцюгом і ін.

Для очистки газових викидів від шкідливих домішок останнім часом досліджуються активовані вуглецеві волокна. Їх перевага в порівнянні з активованим вугіллям наступні: вони володіють фільтрувальними і адсорбційними властивостями, високою швидкістю процесів адсорбції-десорбції, а також високою хімічною, термічною і радіаційною стійкістю.

8.2. Будова і принцип дії адсорберів

Для очищення газів використовують адсорбери періодичної і безперервної дії. Існують різні конструкції адсорберів: періодичної і безперервної дії, горизонтальні і вертикальні і так далі.

8.2.1. Адсорбери періодичної дії

До апаратів періодичної дії відносяться вертикальні, горизонтальні, кільцеві адсорбери, а також виконані у вигляді трубчастого теплообмінника. Одинична

продуктивність вертикальних одношарових адсорберів зазвичай не перевищує 10000 м³/год.

Адсорбери періодичної дії можуть бути з нерухомим шаром і з киплячим шаром адсорбенту.

Основним позитивним фактором адсорбційних установок періодичної дії з нерухомим шаром адсорбенту є відсутність в них стирання частинок сорбенту в результаті тертя однієї до іншої і до стінки апарату, трубопроводу і тому подібне. В адсорберах періодичної дії досягається достатньо високий ступінь очистки і осушення газів, що подаються в апарат.

Основними недоліками адсорберів періодичної дії є невеликі швидкості газового потоку в шихті і відносно мала частка сорбенту, що бере активну участь в процесі (зона масопередачі, як правило, значно менша загальної товщини шару). Крім того, великий переріз горизонтальних адсорберів не забезпечує рівномірності розподілу парогазових потоків по перерізу і, отже, повноти використання адсорбційної ємності сорбенту. Тому вертикальні адсорбери в порівнянні з горизонтальними раціональніші у використанні. Адсорбери горизонтальної конструкції доцільно застосовувати при очищенні великих кількостей газу від домішок, що добре сорбували.

У адсорбційних установках періодичної дії передбачають декілька адсорберів для різних технологічних стадій – адсорбції, десорбції, сушки або охолодження.

Адсорбери з нерухомим шаром виконують у вигляді циліндричних вертикальних або горизонтальних ємностей, заповнених шаром адсорбенту. У таких апаратах адсорбцію проводять по стадіях: 1) адсорбція; 2) десорбція; 3) сушка адсорбенту і 4) охолодження адсорбенту. Нові конструкції адсорберів періодичної дії дозволяють більш ефективніше проводити процес. До них відносять адсорбер полицного багатосекційного типу (рис. 8.1).

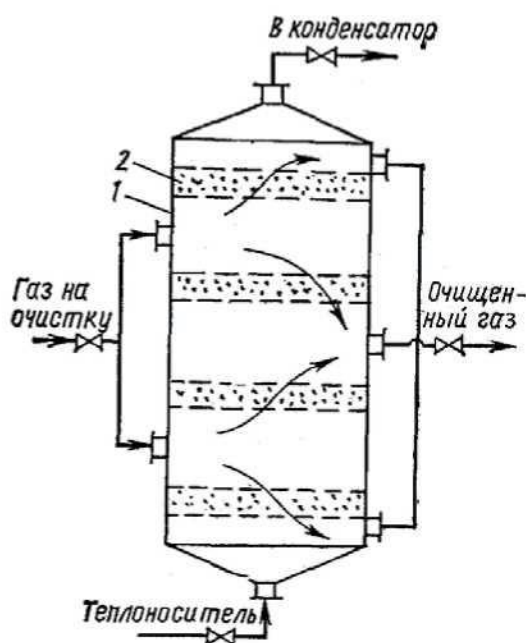


Рис. 8.1. Адсорбер полицного типу з нерухомими шарами адсорбенту

Розміщуючи адсорбент в апараті горизонтально високим шаром, можна

практично усунути вплив нерівномірності шару на ступінь очистки газів, але при цьому зростає аеродинамічний опір адсорбера. Крім того частинки адсорбенту у високому шарі інтенсивно прогріваються внаслідок слабого теплопроводу із зони конденсації, що зменшує сорбційну ємність адсорбенту і є небажаним внаслідок можливості samozapalennia. Якщо концентрація забруднювача висока, то може стати необхідним штучне охолодження шару адсорбенту.

Однократне використання адсорбентів в апаратах періодичної дії може передбачатися при необхідності епізодичної обробки або очистки малої кількості забруднених газів; при низьких концентраціях забруднювачів; при очищенні газів, що містять бактеріологічні, радіоактивні забруднення або високі дози сильнодіючих отруйних речовин. У таких випадках найзручніше упаковувати адсорбент в касети спільно з фільтрами або поміщати в контейнери з приєднувальними елементами.

Тривалість роботи періодичних адсорберів на стадії адсорбції визначається повнотою поглинання забруднюючого компоненту.

Для нестационарного адсорбера із закріпленим шаром необхідно визначити момент проскакування. Проскакування відбувається, коли концентрація забруднювача, що змінюється, у відхідному газовому потоці досягає певного заданого значення, яке може бути, наприклад, рівно величині, що допускається стандартами для даного викиду. Час, необхідний для досягнення проскакування, визначається з рівнянь масопереносу і умов рівноваги; воно, у свою чергу, дозволяє визначити необхідну кількість адсорбенту. Діаметр адсорбційного шару розраховують, як і у випадку абсорбції, виходячи з допустимої величини гідравлічного опору.

У адсорберах з нерухомим шаром газ безперервно проходить через адсорбент, який в початковий момент часу не містить адсорбату (рис. 8.2).

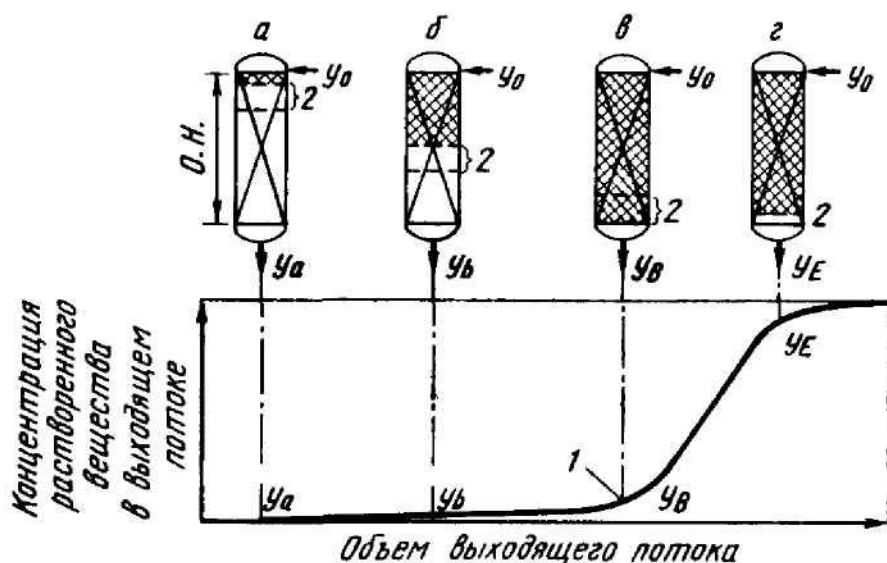


Рис. 8.2. Нестационарна адсорбція в закріпленому шарі сорбенту

1 – точка проскакування; 2 – адсорбційна зона; О.Н. – об'єм, заповнений насадкою

Спочатку адсорбент контактує з вихідним концентрованим розчином. В результаті проходження через весь шар адсорбенту майже вся розчинена речовина видаляється з розчину. Рисунок (рис. 8.2) ілюструє процес при подачі потоку зверху

вниз; рис. 4.2, *a* відповідає випадку, коли вхідний потік практично не містить розчиненої речовини.

Найвища частина шару насичується, тому основна адсорбція відбувається в порівняно вузькій частині шару сорбенту, де концентрація швидко змінюється. Ця вузька адсорбційна зона зміщується вниз по шару, утворюючи концентраційну хвилю; швидкість зміщення набагато менша, ніж лінійна швидкість газу, що проходить через шар сорбенту. З часом концентрація розчиненої речовини у відхідному потоці зростає. Коли вона досягає наперед заданого граничного значення, яке, наприклад, може визначатися вимогами законодавства з охорони навколишнього середовища, вважають, що відбулося проскакування. Після цього концентрація розчиненої речовини швидко зростає, оскільки адсорбційна зона виходить за межі шару сорбенту; зрештою концентрація розчиненої речовини на виході стає такою ж, як і в вихідному розчині. Залежність концентрації від об'єму вхідного потоку в цій області носить назву "крива проскакування".

Якщо пара речовини адіабатично адсорбуються з газової суміші, то тепловиділення в процесі адсорбції описується температурною кривою, яка проходить по шару сорбенту аналогічно кривій адсорбції. Підвищення температури відхідного потоку може слугувати вказівкою на наближення проскакування.

Час, через який відбувається проскакування, і форма кривої проскакування роблять значний вплив на режим роботи адсорберів з нерухомим шаром. Форма кривої визначається фактичною швидкістю і механізмом адсорбційних процесів, природою адсорбційної рівноваги, швидкістю подачі рідини, концентрацією розчиненої речовини і висотою шару сорбенту. В деяких випадках точка проскакування виражена дуже різко, а іноді її вельми важко виявити.

Як правило, час до настання проскакування зменшується із зниженням висоти шару і збільшенням розміру частинок адсорбенту, швидкості подачі сировини і концентрації розчиненої речовини в ній. При проектуванні процесу потрібно визначати час до настання проскакування, для чого необхідно побудувати криву проскакування.

В схемі, наведеній на рис. 8.3, адсорбер може працювати за трьома технологічними циклами: чотирифазному, трифазному і двофазному. При чотирьохфазному циклі послідовно проводяться адсорбція, десорбція, сушка і охолодження адсорбенту. Три останні стадії є процесом регенерації адсорбенту, тобто відновлення його здатності поглинати цільові компоненти з початкової суміші. У трифазному циклі адсорбент після регенерації охолоджується вихідною сумішшю на початку фази адсорбції. При двофазному циклі частина вихідної суміші подається в адсорбер спочатку з підігріванням, а потім без нього, або ж протягом всієї стадії адсорбції суміш подається при одній температурі. Цим досягається поєднання сушки і охолодження із стадією адсорбції.

Безперервність процесу по газовій фазі забезпечується з'єднанням декількох однакових адсорберів в батарею.

Безперечною перевагою таких установок є їх простота і надійність, що при сучасних можливостях автоматизації компенсує недоліки, пов'язані з періодичністю дії окремих апаратів.

Для забезпечення безперервної роботи установки необхідно мати в схемі не менше двох адсорберів. Зазвичай, враховуючи різний час протікання стадій, в одній

установці вмонтовують від трьох до шести адсорберів.

Наведена на рис. 8.3 схема адсорбційної установки рекуперації летких розчинників працює по чотирьохфазному циклу.

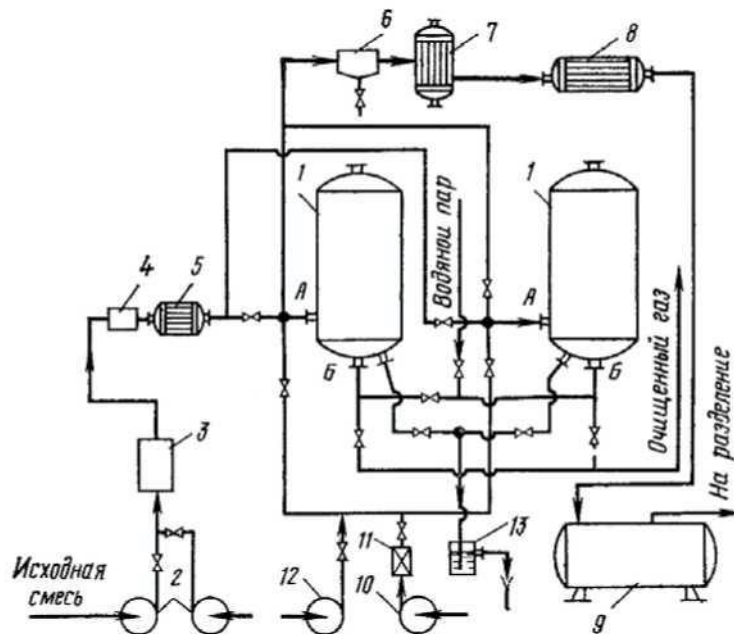


Рис. 8.3. Схема адсорбційної установки періодичної дії з нерухомим шаром адсорбенту:

- 1 – адсорбер; 2, 10, 12 – вентилятори; 3 – фільтри; 4 – **вогнезагороджувач**; 5, 8 – холодильник; 6 – розподільник; 7 – конденсатор; 9 – збірник; 11 – калорифер; 13 – гідрозасув

Вихідна суміш подається в адсорбер 1 вентиляторами 2 через рукавні фільтри 3, **вогнезагороджувач** 4 з розривними мембранами і холодильник 5. Число адсорберів визначається відповідно до графіка роботи установки, що складається залежно від продуктивності одного апарату і тривалості окремих фаз циклу.

Очищений в результаті адсорбції газ видаляється з адсорбера. Після закінчення фази адсорбції лінія подачі вихідної суміші (вентилятор, фільтр, **вогнезагороджувач**, холодильник) перемикаються на наступний адсорбер, в якому вже пройшли стадії регенерації адсорбенту (десорбція, сушка, охолодження), а в першому апараті починається десорбція.

Пара під тиском 0,3...0,5 Мпа подається на десорбцію в адсорбер 1 (тиск в адсорбері до 0,05 Мпа) через штуцер Б. Суміш вилучаємого компонента з так званою динамічною парою (пара, яка не конденсується в шарі адсорбенту) виходить з адсорбера через штуцер А і надходить через розподільник 6 в конденсатор 7, холодильник 8 і збірник 9. Із збірника 9 суміш йде на розподілення (відстоювання, ректифікація і т.д.).

Утворений конденсат зігріваючої пари в адсорбері (частина пари, що йде на підігрів системи до температури процесу, на десорбцію вилучаємого компонента, на компенсацію негативної теплоти змочування адсорбенту водою і на компенсацію втрат тепла) видаляється через гідрозасув 13.

Повітря для сушки вентилятором 10 нагрівається в калорифері 11 до 80...100°C, подається в адсорбер через штуцер А і видаляється з адсорбера через штуцер Б.

Вентилятор 12 через штуцер А подає на охолодження адсорбенту атмосферне повітря, яке видаляється з адсорбера через штуцер Б (за наявності в схемі тільки двох адсорберів для цієї мети може бути використаний вентилятор 10). На цьому цикл закінчується, і адсорбер перемикається на стадію адсорбції.

Тривалість фаз процесу прийнято зображати у вигляді графіків або таблиць, які називають циклограмами.

Нижче наведена циклограма роботи установки рекуперації, що складається з двох адсорберів і працює по чотирьохфазному циклу (*a* – адсорбція, *d* – десорбція, *c* – сушка, *o* – охолодження).

Таблиця 8.2

Циклограма роботи установки рекуперації

Время, ч	1	2	3	4	5	6	7	8
Адсорбер №1	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>o</i>	-
Адсорбер №2	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>o</i>	-	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>
Время, ч	9	10	11	12	13	14	15	
Адсорбер №1	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>o</i>	
Адсорбер №2	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>o</i>	-	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	

Вибір циклу (чотири-, три- або двофазний) визначається техніко-економічним розрахунком, що проводиться у кожному конкретному випадку залежно від призначення процесу (рекуперація, знешкодження відходів виробництва, створення безпечних умов праці і т.п.).

У практиці адсорбційного очищення газів найбільш поширені циліндричні вертикальні і горизонтальні адсорбери.

Вертикальні адсорбери виготовляють декількох модифікацій. Адсорбери з верхнім введенням вихідної суміші (рис. 8.4) виконують із сталевого листа завтовшки 8...10 мм. Циліндрична **обичайка** при висоті до 2,2 м може мати діаметр 2; 2,5 і 3 м залежно від необхідної продуктивності. Днище і кришка – конічні. Висота шару сорбенту вибирається в інтервалі від 0,5 до 1,2 м. Адсорбент в цих апаратах поміщається на розбірних решітках, які розташовуються на балках. Останні встановлюють на опори, приварені до стінки корпусу адсорбера.

Для запобігання попаданню сорбенту під решітку на ній розміщують два шари сітки з неіржавіючої сталі або шар кускового гравію завтовшки 100...200 мм. Сітку використовують з чарунками наступних розмірів: нижній шар – від 3,2х3,2 до 4х4 мм при діаметрі проволочи 0,9...1,0 мм; верхній шар – від 1,4х1,4 до 1,8х1,8 мм при діаметрі проволочи 0,65...0,7 мм. При використанні гравію прямо на решітку кладуть шматки розміром 25...30 мм, на них – розміром 15...20 мм, потім – 7...15 мм, а на них – 5...7 мм. Для регенерації активного абсорбенту найчастіше застосовують насичену водяну пару, яка надходить у вугільну шихту знизу під решітку. При використанні як підкладки шару гравію для його підігріву потрібне значне додаткове тепло, тому вигідніше використовувати підкладку із сіток. Для запобігання винесення вугілля шар сорбенту покривають зверху сіткою з чарунками розміром від 2,2х2,2 до 2,5х2,5 мм при діаметрі проволочи 0,7...0,8 мм. Сітка фіксується зверху вантажем у вигляді чавунних відливок з поперечним перерізом 25х25 мм, завдовжки 600...900 мм.

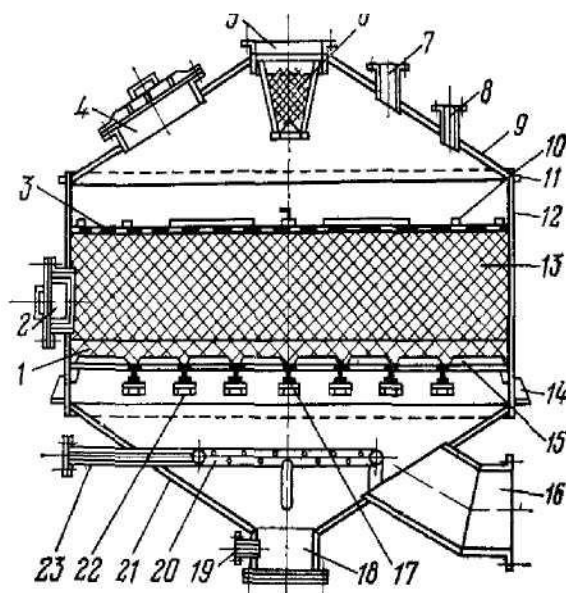


Рис. 8.4. Адсорбери періодичної дії з нерухомим шаром адсорбенту

1 – гравій; 2 – розвантажувальний люк; 3, 6 – сітки; 4 – завантажувальний люк; 5 – штуцер для подачі вихідної суміші; 7 – штуцер для відведення пари при десорбції; 8 – штуцер для запобіжного клапана; 9 – кришка; 10 – вантажі; 11 – кільце жорсткості; 12 – корпус; 13 – адсорбент; 14 – опорне кільце; 15 – решітка; 16 – штуцер для відведення очищеного газу; 17 – балки; 18 – оглядовий люк; 19 – штуцер для відведення конденсату і подачі води; 20 – барботер; 21 – днище; 22 – опори балок; 23 – штуцер для подачі водяної пари через барботер

У вхідних патрубках поміщають на каркасах розподільні дротяні сітки з міді або неіржавіючої сталі з чарункою 2,2x2,2 мм при діаметрі проволочи 0,8 мм. Водяну пару для проведення десорбції подають через кільцевий барботер, розташований під решіткою, з отворами діаметром 4...6 мм. На верхній кришці адсорбера є штуцер для установки запобіжного клапана.

Горизонтальні адсорбери (рис. 8.5) виготовляють діаметром 1,8 і 2 м при довжині циліндричної частини корпусу 3...9 м; днища еліптичні; висота шару адсорбенту 0,5...1,0 м. Корпус виконують з листової неіржавіючої або вуглецевої сталі завтовшки 8...10 мм. У адсорбер, зображений на рис. 8.5, вихідна суміш, сушільний і охолоджуючий гази надходять у верхню частину, в простір над шаром адсорбенту. Вхідні патрубки всередині обладнані розподільними сітками з міді або неіржавіючої сталі з чарунками розміром 2,2x2,2 мм при діаметрі проволочи 0,8 мм. Очищений газовий потік відводиться з нижньої частини адсорбера, з простору під шаром адсорбенту. Пара на десорбцію подається через барботер з отворами діаметром 4...6 мм. При десорбції суміш пари розчинників з парами води відводиться з адсорбера зверху.

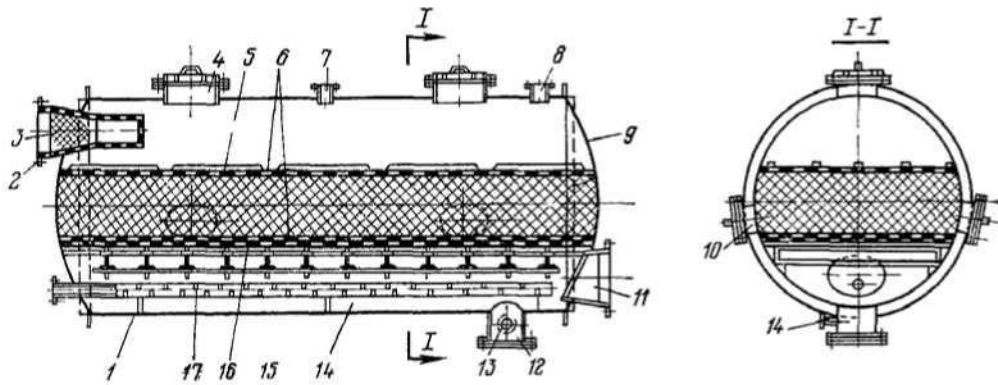


Рис. 8.5. Горизонтальний адсорбер

1 – корпус; 2 – штуцер для подачі пароповітряної суміші при адсорбції і повітря при висушуванні і охолодженні; 3 – розподільна сітка; 4 – завантажувальний люк із запобіжною мембраною; 5 – вантажі; 6 – сітки; 7 – штуцер для запобіжного клапана; 8 – штуцер для відведення пари на стадії десорбції; 9 – шар адсорбенту; 10 – люк для вивантаження адсорбенту; 11 – штуцер для відведення очищеного газу на стадії адсорбції і відпрацьованого повітря при висушуванні і охолодженні; 12 – оглядовий люк; 13 – штуцер для відведення конденсату і подачі води; 14 – опори для балок; 15 – балки; 16 – розбірні решітки; 17 – барботер

Основний недолік горизонтальних адсорберів – нерівномірний розподіл потоків по перерізу адсорбенту і утворення застійних зон. Не дивлячись на простоту конструкції і малий гідравлічний опір, ці адсорбери не знайшли широкого застосування в промисловості.

Адсорбери кільцевого типу. Для очищення газів від домішок, присутніх в невеликих концентраціях, можна застосовувати кільцеві адсорбери. Вертикальні адсорбери, показані на рис. 8.6 є порожнистим циліндром, в який поміщається адсорбент. Вони конструктивно виконані складніше розглянутих вище адсорберів з плоским шаром, але завдяки великому поперечному перетину шихти компактніші і мають велику продуктивність при відносно невисокому гідравлічному опорі.

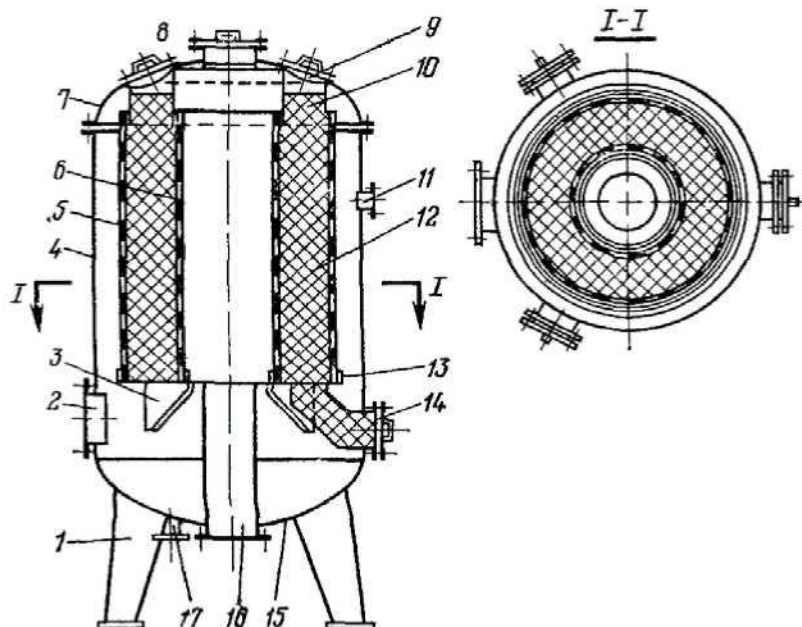


Рис. 8.6. Кільцевий адсорбер

1 – встановлююча лапа; 2 – штуцер для подачі пароповітряної суміші, сушильного і охолоджуючого повітря; 3 – опора для бази під циліндри; 4 – корпус; 5, 6 – зовнішній і внутрішній перфоровані циліндри; 7 – кришка; 8 – оглядовий люк; 9 – завантажувальний люк; 10 – бункер-компенсатор; 11 – штуцер для запобіжного клапана; 12 – шар активного вугілля; 13 – база для циліндрів; 14 – розвантажувальний люк; 15 – днище; 16 – штуцер для відведення очищеного і відпрацьованого повітря і для подачі водяної пари; 17 – штуцер для відведення пари і конденсату при десорбції і для подачі води

Апарати виконуються діаметром до 3,2 м, заввишки до 8 м. Завантажувальні люки розташовані на верхній кришці, а розвантажувальний – внизу циліндричної обичайки. Вихідна суміш рухається від периферії до центру, що сприяє кращому використанню адсорбенту, оскільки в міру зниження концентрації цільового компонента в суміші зменшується площа перерізу шару. Тип адсорбера вибирають з урахуванням конкретних умов процесу, причому вертикальні адсорбери застосовують на установках малої і середньої потужності, продуктивністю до 30000 м³/год вихідної суміші. Горизонтальні і кільцеві адсорбери працюють на установках середньої і великої потужності.

Запропоновані конструкції, в яких стадії адсорбції і десорбції поєднані в одному корпусі. Проте більш інтенсивнішими є апарати безперервної дії з рухомим шаром адсорбенту і псевдозрідженим шаром адсорбенту. Запропоновано декілька конструкцій апаратів безперервної дії.

8.2.2. Адсорбери безперервної дії

Одним з шляхів інтенсифікації адсорбційного процесу є застосування безперервної адсорбції. Переваги безперервних адсорбційних процесів з рухомим щільним шаром сорбенту наступні:

- висока швидкість парогазового потоку в шихті (в порівнянні з швидкостями в стаціонарному шарі);
- високий коефіцієнт використання сорбенту;
- відсутність енерговитрат на періодичне нагрівання і охолодження в одному і тому ж апараті;
- можливість повної автоматизації і простота обслуговування.

Недоліки безперервних процесів:

- високі вимоги до міцності зернистого сорбенту (необхідно використовувати високоміцні адсорбенти сферичної форми);
- необхідність застосування дорогого теплоносія;
- ерозія апаратури;
- низький коефіцієнт теплопередачі, що вимагає великі площі теплообмінних поверхонь в колоні (холодильник, десорбер).

Безперервність процесу може бути досягнута циркуляцією адсорбенту в замкнутій системі і розподілом в адсорбційній колоні локальних зон, в кожній з яких в оптимальних робочих умовах здійснюється одна з основних стадій процесу: адсорбція, нагрівання і десорбція, охолодження і так далі.

Адсорбційні установки з рухомим шаром поглинача відносяться до установок безперервної дії. Адсорбент переміщається в апараті щільним шаром під дією сили тяжіння, що дозволяє організувати безперервну роботу. Ці установки доцільно застосовувати для виділення цільового компонента з газу-носія з використанням адсорбційної і десорбції секцій.

Схема адсорбера з рухомим шаром зернистого адсорбенту показана на рис. 8.7, з псевдозрідженим шаром – на рис. 8.8.

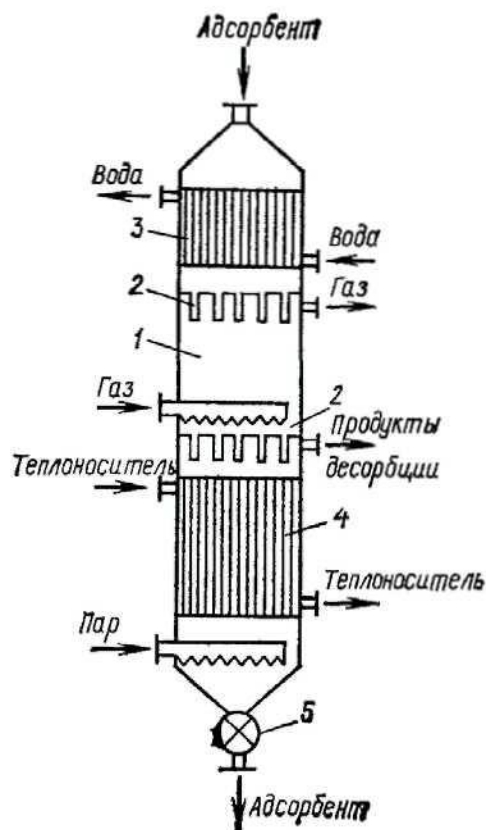


Рис. 8.7. Адсорбер з рухомим шаром адсорбенту

1 – зона адсорбції; 2 – розподільні тарілки; 3 – холодильник; 4 – підігрівач; 5 – затвор

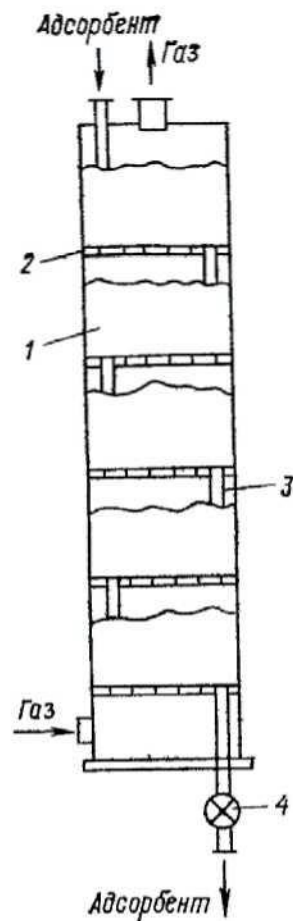


Рис. 8.8. Схема багатоступінчатого адсорбера з псевдозрідженим шаром
1 – псевдозріджений шар; 2 – решітка; 3 – переточний пристрій; 4 – затвор

Для перетоку адсорбенту з тарілки на тарілку використовують різні переточні пристрої (рис. 8.9). Переточний пристрій з додатковим псевдозрідженим шаром адсорбенту показаний на рис. 8.10; з конічним замочним пристроєм – на рис. 8.11 і з автономним підведенням газу – на рис. 8.12.

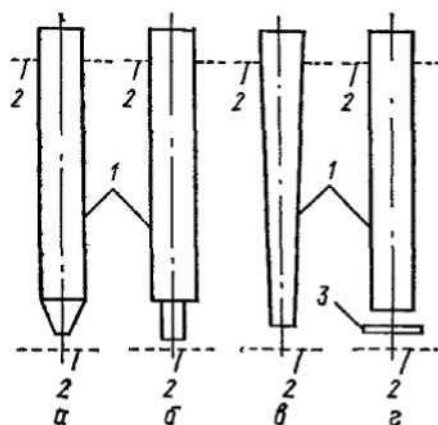


Рис. 8.9. Типи переточних трубок адсорбера:

а – циліндрична з конічним звуженням; б – циліндрична з циліндричним звуженням; в – конічна; г – циліндрична з підпірним диском (1 – переточна трубка; 2 – тарілка; 3 – диск)

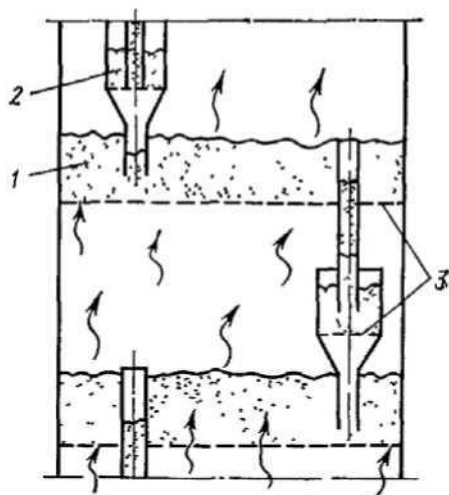


Рис. 8.10. Переточний пристрій з додатковим псевдо зрідженим шаром адсорбенту
1 – основний псевдозріджений шар; 2 – додатковий шар; 3 – решітка

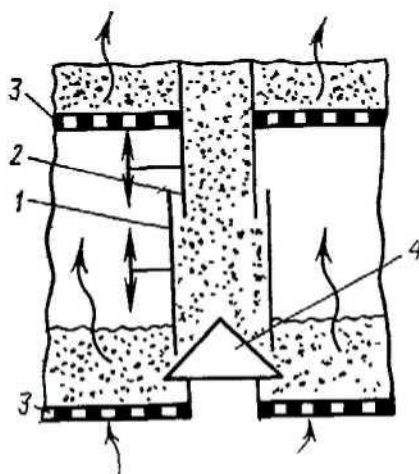


Рис. 8.11. Переточний пристрій з конічним замочним пристроєм
1, 2 – патрубки; 3 – решітка; 4 – конус

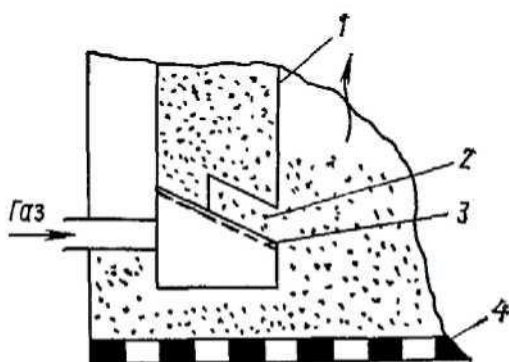


Рис. 8.12. Переточний пристрій з автономним підведенням газу
1 – корпус перетоку 2 – щілина; 3 – похила решітка; 4 – решітка

Розроблені конструкції адсорберів з провальними тарілками і регульованим вільним перерізом (рис. 8.13). Запропоновані також конструкції тарілок із спіралеподібною щілиною.

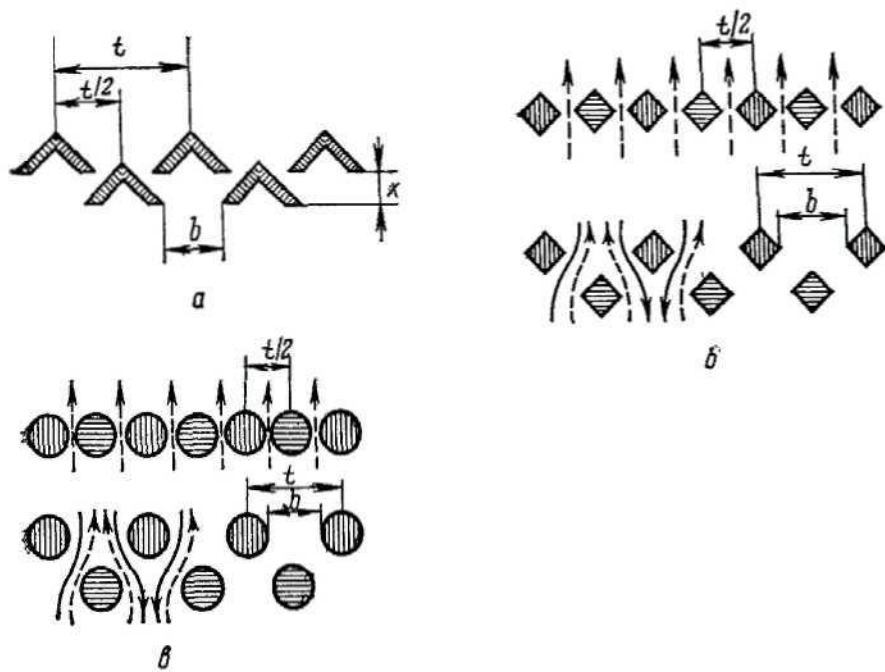


Рис. 8.13. Елементи двошарових провальних тарілок
 a – вугільні; $б$ – квадратні; $в$ – круглі

Для безперервної подачі в апарат адсорбенту застосовують різні пристрої живлення (рис. 8.14). Витрата адсорбенту регулюється переміщенням шибера або зміною числа оборотів зірки або диску.

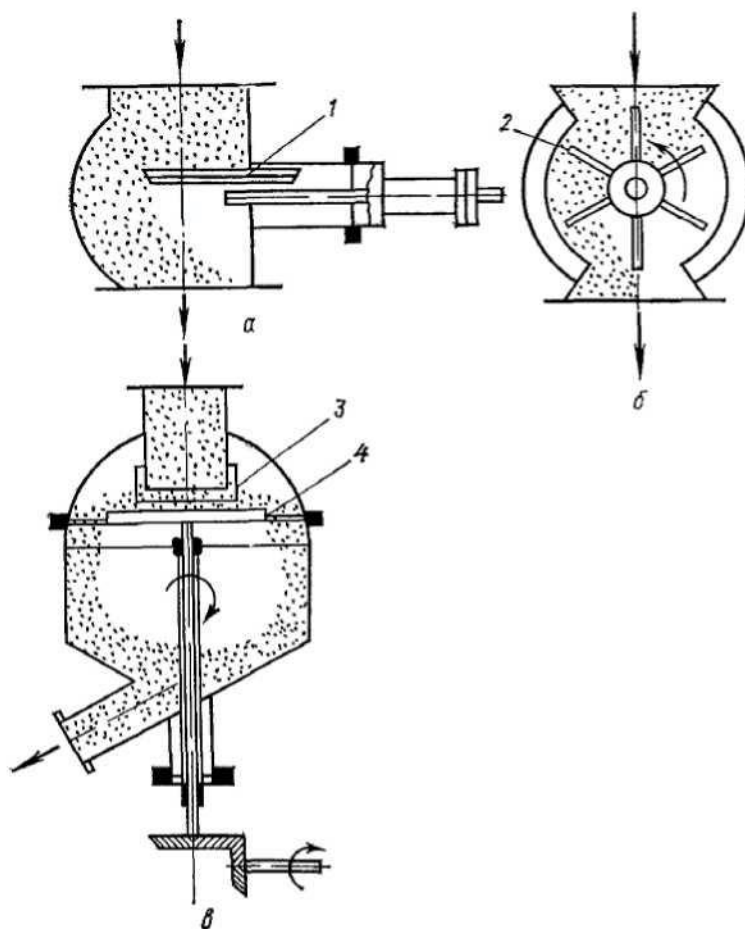


Рис. 8.14. Схеми типових пристроїв живлення

a – шибєрний; *б* – секторний; *в* – тарілчастий (1 – шибєр; 2 – зірка; 3 – регулюючий патрубєк; 4 – диск)

Перевагою зрідженого шару є висока швидкість теплопередачі при використанні охолоджуючих трубок для відведення тепла адсорбції. Даний варіант також ефективний в тих випадках, коли потрібна часта регенерація сорбєнту. Він може бути використаний для адсорбції органічних сполук з газів, які мають високу вологість, що вимагає частї регенерації використовуваного вугілля, при якій видаляється адсорбована вода.

Одна з основних переваг, завдяки якій адсорбєри з псевдозрідженим шаром знаходять застосування – це можливість інтенсивного тепловідводу з сорбційної зони. Проте через швидке насичення адсорбєнту найбільш ефективною областю їх використання є обробка газів з невисокою концентрацією забруднювачів.

Важливою технологічною проблемою, наслідком якої є зниження економічної ефективності, вважають стирання сорбєнту, що призводить до його втрат. Бажано використовувати дуже тверді гранули, стійкі до стирання.

Всі переваги і недоліки псевдозрідженого шару характерні для фонтануючого режиму. Фонтанування адсорбєнту особливо ефективно для здійснення процесів хемосорбції. Швидкість процесу хемосорбції зростає із збільшенням дисперсності частинок, а тонкодисперсні частинки погано піддаються псевдозрідженню. Інтєнсифікувати процес хемосорбції найзручніше за допомогою організації фонтануючого режиму такого адсорбєнту.

8.3. Принципи розрахунку адсорберів

Процес видалення забруднюючої речовини з газу-носія в шарі адсорбенту може бути описаний за допомогою “адсорбційної хвилі”, показаної на рис. 8.15.

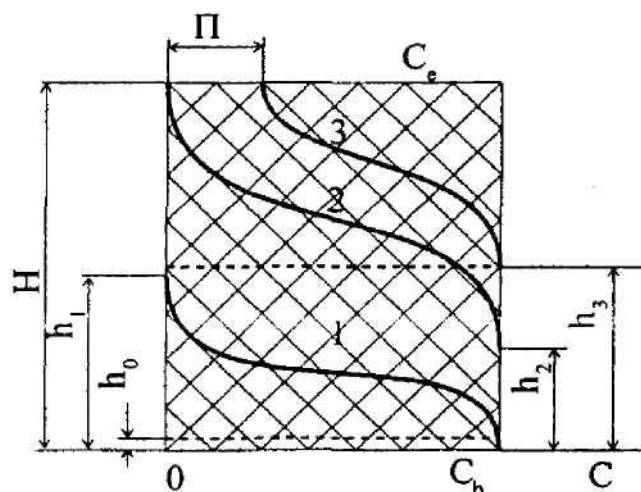


Рис. 8.15. Рух адсорбційної хвилі по стаціонарному шару

Крива 1 характеризує залежність концентрації забруднювача від положення шару для свіжого адсорбенту, а горизонтальна лінія C_0 – максимально допустиму концентрацію забруднювача в газових викидах після адсорбційної обробки. При правильній конструкції адсорбера вихідні концентрації набагато нижче цього значення. В процесі роботи на вході в адсорбційний шар відбувається насичення і забруднювачі починають проникати далі в глибину шару, де відбувається їх ефективна адсорбція (крива 2). Нарешті, в тих випадках, коли досягається максимально допустима концентрація на виході з шару (крива 3), адсорбент необхідно регенерувати.

Процес адсорбції включає проведення стадійного або безперервного контакту, як і у випадку рідинної абсорбції, при якій переважно абсорбується тільки один компонент газової фази. При адсорбції більш ніж одного компоненту, процес більш схожий зі фракціонуванням, зокрема, з екстракцією.

Для розбавлених розчинів, нехтуючи тепловими ефектами, можна отримати формули, які відповідають ізотермічному процесу.

8.3.1. Розрахунок адсорберів періодичної дії

Найбільш поширеним масообмінним процесом очищення газових викидів, який здійснюють в апаратах з нерухомим шаром твердої фази, є адсорбція. Такого роду процеси є нестационарними і періодичними. При цьому концентрації в твердому матеріалі і в газі, що знаходяться всередині апарату, змінюються в часі.

В закріпленому шарі адсорбенту відбувається рух адсорбційної зони вниз по колоні. Можна розглянути і такий випадок, коли тверда фаза рухається вгору по колоні протитечією газу з швидкістю, що забезпечує стаціонарність адсорбційної зони в колоні (рис. 8.16).

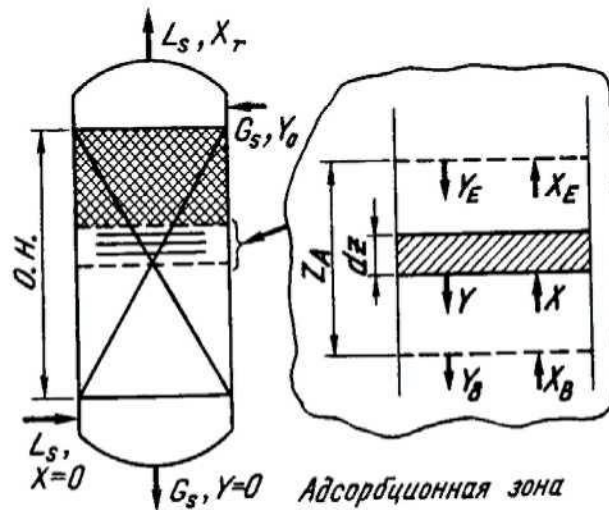


Рис. 8.16. Розрахункова схема адсорбера з нерухомим шаром

На рис. 8.17. показані лінія рівноваги і робоча лінія. Видно, що тверда фаза з концентрацією X_r , розташована у верхній частині, знаходиться в рівновазі з газом, що поступає, концентрацією Y_0 , тобто $X_r = Y_0$, і вся розчинена речовина видаляється з газу до того, як він виходить з колони (насичення в колоні не відбувається). Такий випадок є ідеальним, таким, що вимагає колони з нескінченною висотою.

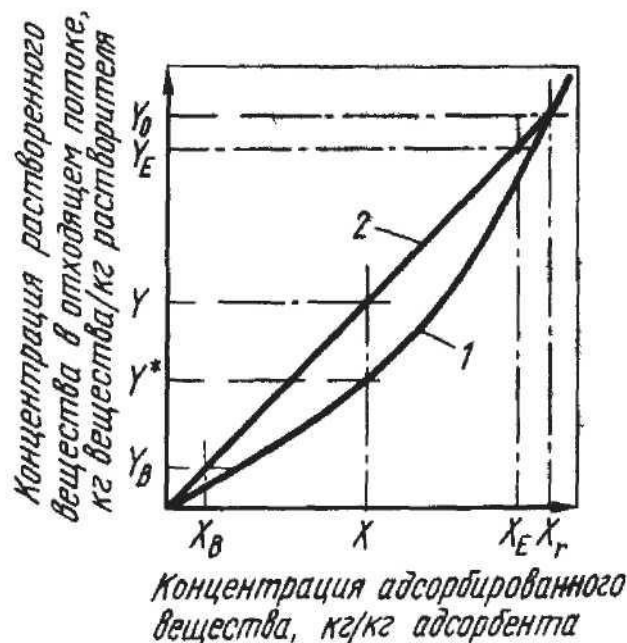


Рис. 8.17. Лінія рівноваги і робоча лінія в адсорбері з нерухомим шаром

Проте найбільший інтерес представляє сама адсорбційна зона. Робоча лінія для всієї адсорбційної колони описується наступними рівняннями:

$$G_s \cdot (Y_0 - 0) = L_s \cdot (X_r - 0); G_s \cdot Y_0 = L_s \cdot X_r,$$

а також

$$G_s \cdot Y = L_s \cdot X,$$

де G_s – швидкість газового потоку-інерту, що подається, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$;

L_s – швидкість потоку адсорбенту, що не містить розчиненої речовини, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.

Тепер можна скласти баланс мас, використовуючи поняття висоти одиниці перенесення:

$$G_s \cdot d \cdot Y = K_Y \cdot a_s \cdot (Y - Y^*) \cdot d \cdot Z,$$

де K_Y – коефіцієнт масопередачі в газовій фазі, кг/(с·м²);

a_s – питома поверхня частинок адсорбенту, м²/м³;

Y^* – рівноважна масова частка (концентрація) розчиненої речовини в газовій фазі, кг/кг.

Тоді висота адсорбата (адсорбційної зони) в адсорбері складе:

$$Z_A = \int_0^{Z_A} dz = \int_{Y_B}^{Y_E} \frac{G_s}{K_Y \cdot a_s} \cdot \frac{d \cdot Y}{Y - Y^*}.$$

Число одиниць перенесення визначається виразом:

$$N_Y = \int_{Y_B}^{Y_E} \frac{d \cdot Y}{Y - Y^*},$$

а висота одиниць перенесення рівна:

$$H_Y = \frac{G_s}{K_Y \cdot a_s}.$$

Отже, висота адсорбційної зони рівна:

$$Z_A = H_Y \cdot N_Y.$$

Для визначення часу, по завершенні якого відбувається проскакування, визначимо спочатку поняття ступеня насичення шару (СНШ). Об'єм адсорбата V – це:

$$V = F \cdot Z.$$

Отже, $Z=V/F$ – об'єм адсорбата на одиницю площі поперечного перерізу адсорбційного шару F .

Тоді, при відомій величині густини шару: $Z \cdot F \cdot \rho_s$ – маса адсорбенту; $Z \cdot F \cdot \rho_s \cdot X_r$ – маса розчиненої речовини, адсорбованої в умовах рівноваги; $(Z - Z_A) \cdot F \cdot \rho_s \cdot X_r$ – маса розчиненої речовини, адсорбованої в тій частині колони, де досягається насичення; $Z \cdot F \cdot \rho_s \cdot X_r \cdot (1 - \varphi)$ – маса розчиненої речовини, адсорбованої в тій частині колони, де насичення не досягається; φ – парціальна здатність адсорбційної зони до адсорбції розчиненої речовини.

Тоді ступінь насичення шару (СНШ) може бути визначена таким чином:

$$\text{СНШ} = \frac{\text{Кількість адсорбованої розчиненої речовини}}{\text{Максимально можлива кількість адсорбованої розчиненої речовини, або рівноважна концентрація}};$$

$$\text{СНШ} = \frac{(Z - Z_A) \cdot F \cdot \rho_s \cdot X_r + Z_A \cdot F \cdot \rho_s \cdot X_r (1 - \varphi)}{Z_A \cdot F \cdot \rho_s \cdot X_r};$$

$$\text{СНШ} = \frac{\varphi \cdot (Z - Z_A)}{Z}.$$

Тоді час, за який досягається проскакування, визначається як:

$$T_B = \frac{\text{Маса розчиненої речовини, що накопичилась на одиницю площі поверхні адсорбційного шару}}{\text{Маса розчиненої речовини у газі, що надходить за одиницю часу на одиницю площі поверхні}};$$

$$T_B = \frac{(\text{СНШ}) \cdot Z \cdot \rho_s \cdot X_r}{G_s \cdot Y_0}.$$

Розрахунки адсорберів періодичної дії з нерухомим адсорбентом можуть виконуватися в наступному порядку.

1. Визначають рівноважну концентрацію забруднювача в твердій фазі. Значення концентрацій забруднювача в адсорбенті, рівноважних при даній температурі з його концентраціями в газовій фазі, виражають у вигляді ізотерми сорбції. По відомій ізотермі сорбції визначають кількість забруднювача, яка може поглинути адсорбент при даній температурі, якщо процес триватиме до рівноважного стану. Форма функціональної залежності $C_{eq}=f(C)$ повинна бути пристосована для практичних розрахунків.

Константи, що входять в рівняння ізотерм сорбції, можуть бути знайдені тільки експериментально. Поки що їх значення надійно визначені лише для деяких видів сорбентів і забруднювачів. Тому доводиться вважати процеси адсорбції будь-яких речовин на однакових сорбентах подібними. На цій підставі ізотерму сорбції даного забруднювача розраховують по емпіричному рівнянню або графіку для якої-небудь із добре досліджених сполук, вважаючи її стандартним, з введенням поправки, яку називають коефіцієнтом афінності і знаходять із співвідношення:

$$z = \frac{V_n}{V_{n.cm}},$$

де V_n , $V_{n.cm}$ – молярні об'єми даної і стандартної речовин, м³/кмоль.

Коефіцієнти афінності деяких речовин по відношенню до бензолу приведені в табл. 8.2.

Таблиця 8.2

Коефіцієнти афінності

Речовина	Формула	z
Метанол	CH ₃ OH	0,4
Метилбромід	CH ₃ Br	0,57
Етилбромід	C ₂ H ₅ Br	0,61
Етанол	C ₂ H ₅ OH	0,61
Мурашина кислота	HCOOH	0,61
Сульфід вуглецю	CS ₂	0,7
Етилхлорид	C ₂ H ₅ Cl	0,76
Пропан	C ₃ H ₈	0,78
Хлороформ	CHCl ₃	0,86
Ацетон	(CH ₃) ₂ CO	0,88
Бутан	C ₄ H ₁₀	0,9
Оцтова кислота	CH ₃ COOH	0,97
Бензол	C ₆ H ₆	1,0
Циклогексан	C ₆ H ₁₂	1,03
Тетрахлорид вуглецю	CCl ₄	1,05
Диетиловий ефір	(C ₂ H ₅) ₂ OCO	1,09
Пентан	C ₅ H ₁₂	1,12
Толуол	C ₇ H ₈	1,25
Хлорпикрін	CCl ₃ NO ₂	1,28
Гексан	C ₆ H ₁₄	1,35
Гептан	C ₇ H ₁₆	1,59

Молярні об'єми забруднювача і стандартної речовини в рідкому стані при 273К обчислюються за формулами:

$$V_n = \frac{m_n}{\rho_k};$$

$$v_n = \frac{m_{n,cm}}{\rho_{cm}},$$

де m_n і $m_{n,cm}$ – молярні маси забруднювача і стандартної речовини, кг/моль;
 ρ_k, ρ_{cm} – густина забруднювача і стандартної речовини при 273К в рідкому стані, кг/м³.

Серйозним відхиленням від реальних характеристик адсорбції є також припущення про ізотермічність процесу. Адсорбція може бути ізотермічною тільки при відповідній організації тепловідводу із зони конденсації. У інших випадках тепло, що виділяється при конденсації адсорбата і змочуванні поверхні адсорбенту, піде на нагрів оброблюваного газу, частинок адсорбенту. Проте з метою спрощення розрахунків вважають адсорбцію ізотермічним процесом, температуру якого $T_{cp}(K)$ знаходять як середню арифметичну між температурами оброблюваного газу на вході і виході адсорбера.

2. Вибирають тип адсорбера і його конструктивні параметри. Приймають фіктивну швидкість оброблюваних газів в адсорбері $w=0,3...0,5$ м/с, по заданій витраті газів підраховують діаметр апарату і підбирають найближчий типорозмір адсорбера вибраної конструкції. По конструктивних характеристиках апарату підбирають прийнятну висоту шару адсорбенту.

3. Визначають коефіцієнт масопередачі. При адсорбції на активованому вугіллі коефіцієнт масовіддачі в газовій фазі рекомендується знаходити з рівняння:

$$Nu = \frac{0,355 \cdot Re^{0,64} \cdot Pr^{0,333}}{\varepsilon};$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_n}{\rho_q},$$

де ε – порозність шару адсорбенту;

ρ_n – насипна густина шару, кг/м³;

ρ_q – густина частинок адсорбенту, кг/м³.

Числа Рейнольдса і Прандтля підраховують за співвідношеннями:

$$Re = \frac{w \cdot d_{q,e} \cdot \rho_g}{\mu_g};$$

$$Pr = \frac{\mu_g}{\rho_g \cdot D_g},$$

де $d_{q,e}$ – еквівалентний діаметр частинок адсорбенту, м;

D_g – коефіцієнт дифузії пари забруднювача, м²/с.

Значення $d_{q,e}$ для активованого вугілля можна прийняти рівним $2 \cdot 10^{-3}$ м.

Коефіцієнт масовіддачі від газу до поверхні адсорбенту (коефіцієнт зовнішньої масовіддачі) β_g знаходять по величині Nu :

$$\beta_g = Nu \cdot \frac{D_g}{d_{q,e}}.$$

Коефіцієнт масовіддачі всередині пор адсорбенту:

$$\beta_a = 10 \cdot \frac{D_a}{d_{q,e}},$$

де D_a – коефіцієнт дифузії в порах адсорбенту, м/с, який може бути надійно визначений тільки на основі дослідних даних.

Якщо відомі розміри пор адсорбенту, то для оцінки величини D_a можна

скористатися рівнянням:

$$D_a = \frac{\varepsilon_q \cdot D_z}{2} \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{2 \cdot d_n}{3D_z} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{m_n}} \right) \right],$$

де ε_q – пористість частинок адсорбенту (частка об'єму пор від об'єму частинки);

d_n – середній діаметр пор сорбенту, м;

R – універсальна газова стала, Дж/(кмоль К);

m_n – молекулярна маса забруднювача, кг/кмоль.

Для активованого вугілля середній діаметр пор можна прийняти орієнтовно в межах $6 \cdot 10^{-9}$ м.

Пористість частинок знаходять із співвідношення:

$$\varepsilon_q = 1 - \frac{\rho_z}{\rho_a},$$

де ρ_z – густина зерна адсорбенту, кг/м³;

ρ_a – густина матеріалу адсорбенту, кг/м³.

Коефіцієнт масопередачі:

$$K_z = \frac{1}{\frac{1}{\beta_z} + \frac{1}{\beta_a}}.$$

Відхилення від режиму ідеального витіснення через повздовжнє перемішування може бути враховане введенням додаткового дифузійного опору, для чого визначається коефіцієнт повздовжнього перемішування C :

$$C = 0,0567 \cdot \frac{w \cdot \text{Re}^{0,22}}{1 - \varepsilon}.$$

Коефіцієнт масопередачі (м/с) з поправкою на повздовжнє перемішування знаходять із співвідношення:

$$K_z' = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{1}{C}}.$$

Об'ємний коефіцієнт масопередачі (с⁻¹):

$$K_{z,V}' = K_z' \cdot a.$$

Якщо надійних відомостей про характеристики пористості адсорбенту немає, то при адсорбції на активованому вугіллі з розмірами частинок 1,7...2,2 мм і фіктивній швидкості потоку $w=0,3...2$ м/с:

$$K_{z,V}' = 1,6 \cdot \frac{D_z}{d_{q,e}^2} \cdot \text{Re}^{0,54}$$

4. Визначають тривалість адсорбції. Для шару адсорбенту висотою h підраховують число одиниць перенесення:

$$N = \frac{K_{z,V}' \cdot h}{w}.$$

Із виразу для безрозмірного часу процесу T :

$$T = w \cdot C_p \cdot \frac{\tau - \frac{h \cdot \varepsilon}{\rho \cdot C \cdot h}}{w}$$

знаходять час процесу τ (с):

$$\tau = h \cdot \frac{\rho \cdot C + \varepsilon \cdot C_p}{w \cdot C_p},$$

де C_p – рівноважна концентрація забруднювача в адсорбенті, що відповідає його початковій концентрації в газових викидах.

Вихідну криву адсорбції розраховують за допомогою рівняння Томаса:

$$\frac{C}{C_p} = J(\alpha, \gamma),$$

де $J(\alpha, \gamma)$ – функція двох змінних α і γ , які тут відповідно рівні $N_s \cdot T$ і N_s . Значення $J(\alpha, \gamma)$ наведені в табл. 8.3 і 8.4.

Результати розрахунків вихідної кривої зручно представити графічно у вигляді залежності безрозмірних концентрацій C/C_p від безрозмірного часу процесу T (рис. 8.18). За цим графіком для заданої вихідної (кінцевої) концентрації і співвідношення C/C_p неважко відшукати відповідний безрозмірний розрахунковий час T , а за рівнянням – розрахункову тривалість стадії адсорбції τ .

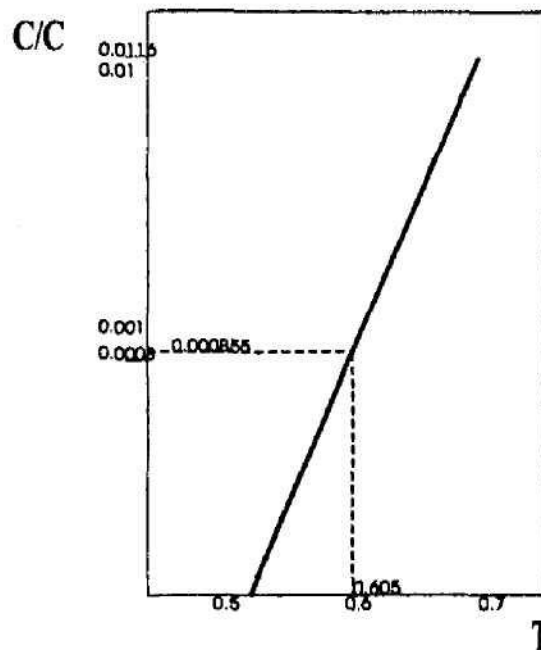


Рис. 8.18. Залежність безрозмірних концентрацій C/C_p від безрозмірного часу процесу T

5. За розрахунковою тривалістю процесу знаходять кількість тепла, що виділяється при адсорбції забруднювача, і оцінюють величину перепаду температур відхідних газів на вході і виході адсорбера. Якщо отриманий перепад температур значно відрізняється від заздалегідь прийнятого (орієнтовно в 1,5...2 рази і більше), то перераховують характеристики процесу.

Таблиця 8.3

Значення функції $J(\alpha, \gamma/\alpha)$

α	γ/α											
	0,1	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,88	0,9
0,01	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901
0,02	0,9802	0,9802	0,9803	0,9804	0,9804	0,9804	0,9804	0,9805	0,9805	0,9805	0,9805	0,9805
0,05	0,9515	0,9516	0,9518	0,9532	0,9524	0,9526	0,9529	0,9530	0,9531	0,9532	0,9532	0,9533
0,10	0,9057	0,9062	0,9071	0,9084	0,9093	0,9101	0,9108	0,9114	0,9119	0,9124	0,9126	0,9128
0,20	0,8220	0,8238	0,8267	0,8314	0,8374	0,8314	0,8395	0,8417	0,8460	0,8445	0,8454	0,8460
0,50	0,6214	0,6291	0,6427	0,6628	0,6756	0,6880	0,7248	0,7056	0,7092	0,7152	0,7189	0,7248
1,0	0,4038	0,4167	0,4543	0,5010	0,5301	0,5578	0,5758	0,5965	0,6090	0,6139	0,6233	0,6318
1,5	0,2724	0,2952	0,3425	0,4078	0,4487	0,4874	0,5159	0,5858	0,5581	0,5688	0,5792	0,5858
2	0,1957	0,2162	0,2690	0,3456	0,3943	0,4409	0,4731	0,5064	0,5259	0,5417	0,5528	0,5602
3	0,0992	0,1235	0,1778	0,2633	0,3209	0,3777	0,4175	0,4597	0,4842	0,5066	0,5184	0,5297
4	0,0528	0,0745	0,1234	0,2085	0,2700	0,3331	0,3827	0,5129	0,4571	0,4864	0,4996	0,5129
5	0,0309	0,0463	0,0878	0,1686	0,2313	0,2982	0,4998	0,4011	0,4333	0,4682	0,4998	0,4998
6	0,0198	0,0298	0,0635	0,1380	0,063	0,2695	0,3257	0,3796	0,4169	0,4536	0,4720	0,4891
8	0,0077	0,0152	0,0341	0,0948	0,1535	0,2242	0,45260	0,3446	0,3886	0,4699	0,4526	0,4699
10	0,0025	0,0089	0,0188	0,0665	0,1198	0,4547	0,4547	0,3163	0,3638	0,4090	0,4348	0,4547
15	0,0006	0,0013	0,0045	0,0288	0,0674	0,1292	0,3711	0,2627	0,3125	0,3711	0,4032	0,4259
20		0,0006	0,0011	0,0130	0,0393	0,0909	0,1652	0,4040	0,2792	0,3448	0,3798	0,4040
30			0,0002	0,0028	0,0142	0,0472	0,1161	0,1619	0,2268	0,2997	0,3414	0,3703
40				0,0006	0,0053	0,0254	0,3138	0,1258	0,1881	0,2644	0,3138	0,3440
50				0,0002	0,0021	0,0140	0,0572	0,0961	0,1580	0,2379	0,2879	0,3221
60				0,0000	0,0008	0,0078	0,0410	0,0754	0,1339	0,2159	0,2685	0,3032
80					0,0001	0,0025	0,0215	0,0473	0,0979	0,1808	0,2348	0,2714
100					0,0000	0,0008	0,0116	0,0299	0,0727	0,1528	0,2453	0,2453
150							0,0026	0,0110	0,0361	0,0931	0,1478	0,1951
200							0,0006	0,0040	0,0185	0,0624	0,1109	0,1585
300								0,0006	0,0052	0,0293	0,0694	0,1082
400								0,0001	0,0015	0,0143	0,0442	0,0759
500									0,0008	0,0078	0,0261	0,0541
600										0,0046	0,0166	0,0390
800										0,0025	0,0069	0,0207
1000										0,0012	0,0029	0,0112

Таблиця 8.4

Значення функції $J(\alpha, \gamma/\alpha)$

α	γ/α													
	0,92	0,94	0,95	0,96	0,98	1,0	1,02	1,04	1,05	1,06	1,08	1,10	1,12	1,15
0,01	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9902
0,02	0,9805	0,9805	0,9806	0,9806	0,9806	0,9806	0,9806	0,9806	0,9806	0,9806	0,9806	0,9806	0,9806	0,9807
0,05	0,9533	0,9533	0,9534	0,9535	0,9535	0,9536	0,9536	0,9537	0,9537	0,9537	0,9538	0,9538	0,9538	0,9539
0,10	0,9129	0,9130	0,9131	0,9132	0,9134	0,9135	0,9137	0,9138	0,9138	0,9145	0,9142	0,9143	0,9145	0,9147
0,20	0,8465	0,8470	0,8473	0,8476	0,8481	0,8487	0,8492	0,8498	0,8501	0,8503	0,8508	0,8513	0,8516	0,8527
0,50	0,7264	0,7279	0,7288	0,7296	0,7312	0,7329	0,7368	0,7389	0,7408	0,7412	0,7421	0,7429	0,7442	0,7461
1,0	0,6358	0,6415	0,6456	0,6492	0,6519	0,6543	0,6611	0,6664	0,6702	0,6738	0,6768	0,6789	0,6828	0,6857
1,5	0,5920	0,5986	0,6044	0,6096	0,6140	0,6215	0,6314	0,6388	0,6431	0,6460	0,6493	0,6522	0,6598	0,6657
2	0,5669	0,5749	0,5810	0,5876	0,5932	0,6035	0,6145	0,6220	0,6227	0,6308	0,6349	0,6384	0,6491	0,6578
3	0,5396	0,5458	0,5535	0,5601	0,5681	0,5833	0,5966	0,6039	0,6098	0,6162	0,6205	0,6258	0,6410	0,6546
4	0,5132	0,5311	0,5373	0,5446	0,5558	0,5717	0,5861	0,5948	0,6018	0,6084	0,6138	0,6238	0,6394	0,6542
5	0,5068	0,5178	0,5254	0,5356	0,5464	0,5639	0,5798	0,5901	0,5978	0,6045	0,6115	0,6235	0,6392	0,6559
6	0,4970	0,5074	0,5163	0,5249	0,5382	0,5582	0,5775	0,5870	0,5956	0,6024	0,6110	0,6232	0,6402	0,6597
8	0,4803	0,4918	0,5020	0,5138	0,5207	0,5503	0,5719	0,5839	0,5924	0,6011	0,6119	0,6259	0,6437	0,6657
10	0,4651	0,4782	0,4921	0,5032	0,5205	0,5449	0,5684	0,5822	0,5904	0,6002	0,6139	0,6298	0,6478	0,6721
15	0,4383	0,4568	0,4719	0,4865	0,5058	0,5366	0,5618	0,5801	0,5902	0,6038	0,6202	0,6402	0,6202	0,6882
20	0,4206	0,4401	0,4685	0,4738	0,4971	0,5316	0,5601	0,5808	0,5910	0,6064	0,6265	0,6518	0,6716	0,7034
30	0,3916	0,4176	0,4398	0,4558	0,4819	0,5258	0,5598	0,5849	0,5985	0,6168	0,6428	0,6705	0,6922	0,7309
40	0,3708	0,4019	0,4259	0,4429	0,4737	0,5223	0,5580	0,5919	0,6058	0,655	0,7588	0,6884	0,7158	0,7588
50	0,3531	0,3879	0,4156	0,4338	0,4672	0,5200	0,5599	0,5975	0,6142	0,6341	0,6689	0,7044	0,7258	0,7812
60	0,3379	0,3778	0,4068	0,4263	0,4620	0,5182	0,5603	0,6034	0,6233	0,6432	0,6819	0,7188	0,7538	0,7996
80	0,3087	0,3576	0,3811	0,4132	0,4528	0,5158	0,5642	0,6128	0,6369	0,6610	0,7041	0,7441	0,7827	0,8298
100	0,2820	0,3362	0,3728	0,4026	0,4447	0,5141	0,5682	0,6242	0,6488	0,6768	0,7239	0,7657	0,8112	0,8572
150	0,2376	0,2980	0,3412	0,3774	0,4302	0,5115	0,5765	0,6448	0,6759	0,7076	0,7622	0,80,8	0,8552	0,9000
200	0,2017	0,2691	0,3152	0,3542	0,4219	0,5100	0,5848	0,6629	0,6980	0,7312	0,7926	0,8415	0,8868	0,9295
300	0,1558	0,2276	0,2744	0,3192	0,4079	0,5081	0,6033	0,6958	0,7340	0,7739	0,8392	0,8879	0,9308	0,9635
400	0,1229	0,1971	0,2425	0,2896	0,3937	0,5071	0,6145	0,7205	0,7630	0,8026	0,8688	0,9189	0,9532	0,9806
500	0,1011	0,1717	0,2156	0,2667	0,3814	0,5063	0,6295	0,7395	0,7857	0,8291	0,8955	0,9405	0,9685	0,9896
600	0,0808	0,1490	0,1939	0,2466	0,3693	0,5058	0,6402	0,7581	0,8068	0,8504	0,9151	0,9939	0,9790	0,9939
800	0,0526	0,1139	0,1618	0,2132	0,3485	0,5050	0,6593	0,7895	0,8411	0,8839	0,9431	0,9753	0,9905	0,9981
1000	0,0348	0,0883	0,1371	0,1861	0,3306	0,5045	0,6758	0,8151	0,8646	0,9088	0,9613	0,9993	0,9956	0,9993

6. За рівнянням Томаса, записаному для безрозмірної концентрації поглиненого адсорбентом забруднювача у вигляді:

$$\frac{C}{C_p} = J(N_s T, N_s),$$

будують профіль концентрацій в адсорбенті (рис. 8.19).

При користуванні таблицями 8.3 і 8.4 необхідно враховувати, що тут $\alpha = N_s T$, а $\gamma/\alpha = N_s/(N_s T) = T^{-1}$. Відстані x (м) від початкового шару адсорбенту до точки з концентрацією C_p представляють у вигляді функції від безрозмірного часу T :

$$x = \frac{\tau \cdot w \cdot C_p}{\rho \cdot C \cdot T + C_p \cdot \varepsilon}.$$

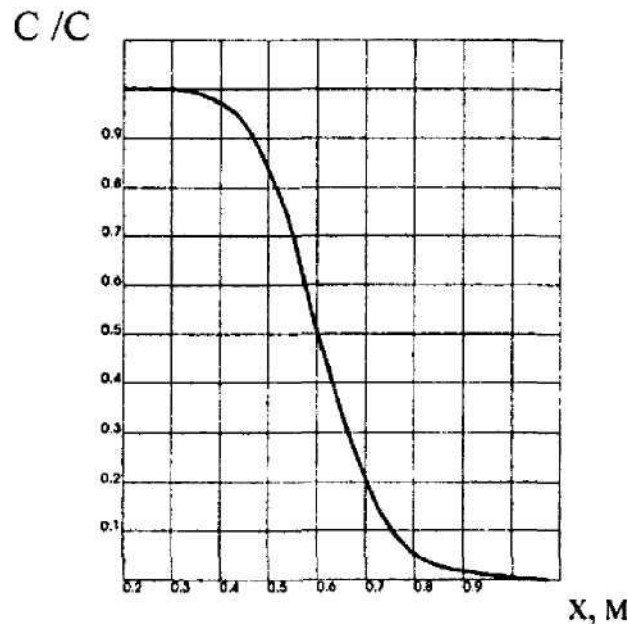


Рис. 8.19. Профіль концентрацій в адсорбенті

7. Виконують перевірку збіжності знайдених параметрів, складаючи матеріальний баланс. Для цього обчислюють кількість забруднювача, що поступив в адсорбер, і порівнюють його з кількістю забруднювача поглиненого адсорбентом, що залишився в газовій фазі шару адсорбенту і вийшов з апарату відповідно до заданого проскакування. Кількість забруднювача, що надходить в адсорбер (кг):

$$M = W \cdot \tau \cdot C.$$

Кількість забруднювача (кг), поглиненого адсорбентом:

$$M_a = \rho \cdot f \cdot C \int_0^H \frac{C}{C_p} \cdot dx,$$

де f – площа поперечного перерізу адсорбера, m^2 .

Кількість забруднювача (кг) в газовій фазі шару адсорбенту:

$$M_{z,a} = \varepsilon \cdot V_a \cdot \frac{C - C_p}{2}.$$

Кількість забруднювача (кг), викинутого в атмосферу:

$$M_a = W \cdot C \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{C}{C_p} \cdot d\tau$$

де τ_0 – час з початку процесу до виходу забруднювача із адсорбера, с;

τ_a – час адсорбції, с.

Інтеграли у вище наведених рівняннях знаходять графічним методом як площі відповідно під профілем концентрації (рис. 8.19) і під вихідною кривою (рис. 8.18).

Складають матеріальний баланс забруднювача:

$$M = M_z + M_{z,a} + M_a.$$

При значній неув'язці лівої і правої частин розрахунки повторюють, варіюючи тривалістю адсорбції або висотою шару адсорбенту.

8. Визначають тривалість допоміжних стадій процесу обробки газів. При компонуванні схеми адсорбції з 4-х апаратів тривалість кожній з допоміжних стадій – десорбції, сушки і охолодження адсорбенту, приймають однаковими з розрахунковою тривалістю адсорбції.

При компонуванні з 2-х або 3-х апаратів можна відводити на стадію десорбції не менше 0,5...1 год, а час, що залишився, ділити порівну на стадії сушки і охолодження.

8.3.2. Розрахунок адсорберів безперервної дії

При розгляді методів проектування стаціонарних адсорберів з рухомим шаром передбачається, що процес протікає в ізотермічних умовах і адсорбується тільки один компонент. В цьому випадку процес аналогічний абсорбції газу. Відмінність полягає лише в заміні рідкого розчинника твердим адсорбентом. Тут і далі швидкості потоків і концентрацій відноситимуться до матеріалів, що не містять розчинених речовин, а замість масової частки використовуватиметься масове відношення. Таким чином: $G_s = \frac{\text{маса газоподібного розчинника}}{\text{одиниця часу} \cdot \text{одиниця площі}}$; $X = \frac{\text{маса адсорбата}}{\text{маса адсорбенту}}$; $Y = \frac{\text{маса розчиненої речовини}}{\text{маса розчину}}$; $L_s = \frac{\text{маса адсорбента}}{\text{одиниця часу} \cdot \text{одиниця площі}}$.

На рис. 8.21 наведена схема протиточного адсорбера з рухомим шаром безперервної дії з видаленням одного компонента. Показані також співвідношення між змінними.

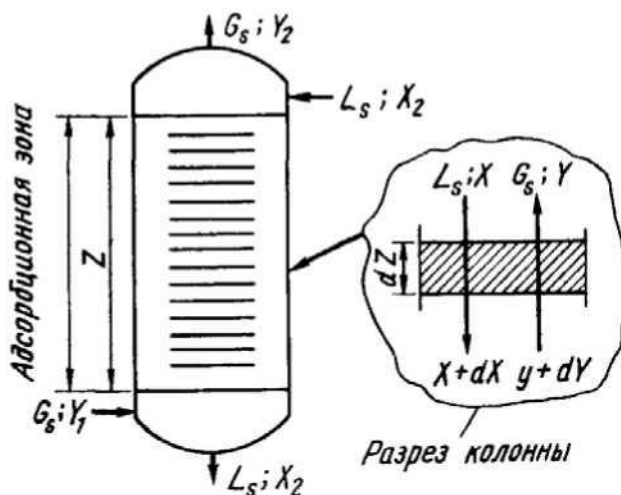


Рис. 8.21. Розрахункова схема протиточного адсорбера

Баланс розчиненої речовини по всій колоні виражається рівнянням:

$$G_s \cdot (Y_1 - Y_2) = L_s \cdot (X_1 - X_2).$$

Аналогічно для верхньої частини колони:

$$G_s \cdot (Y - Y_2) = L_s \cdot (X - X_2).$$

Ці два рівняння задають робочу лінію для системи. Рівняння для верхньої частини колони може бути вирішене відносно Y :

$$Y = \frac{L_s}{G_s} \cdot X + \left(Y_2 - \frac{L_s}{G_s} \cdot X_2 \right).$$

Відповідна залежність Y від X є прямою лінією з нахилом L_s/G_s і відрізком, що відсікається на осі ординат, рівним $[Y_2 - (L_s/G_s)X_2]$.

При адсорбції великих кількостей речовини істотними стають теплові ефекти. Розрахунки цих теплових ефектів дуже складні. При їх проведенні припускають, що адсорбція здійснюється з розбавленої газової суміші. По аналогії з абсорбцією масоперенос характеризують сумарним коефіцієнтом масопереносу в газовій фазі, в який входить величина площі зовнішньої поверхні, що доводиться на одиницю об'єму адсорбенту (питома поверхня контакту фаз), a_s . Швидкість перенесення розчиненої речовини для елемента висоти шару адсорбенту dZ в цьому випадку:

$$L_s \cdot d \cdot X = G_s \cdot d \cdot Y = K_Y \cdot a_s \cdot (Y - Y^*) \cdot d \cdot Z.$$

Тоді

$$Z = \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{G_s}{K_Y \cdot a_s} \cdot \frac{d \cdot Y}{Y - Y^*}.$$

Висота одиниці перенесення визначається як

$$H_Y = \frac{G_s}{K_Y \cdot a_s},$$

а число одиниць перенесення виражається інтегралом

$$N_Y = \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{d \cdot Y}{Y - Y^*}$$

Якщо лінія рівноваги, як і робоча лінія, є прямою, то для отримання N_Y можна використовувати середні логарифмічні значення:

$$N_Y = \frac{Y_1 - Y_2}{\Delta Y_m};$$

$$\Delta Y_m = \frac{(Y_1 - Y_1^*) - (Y_2 - Y_2^*)}{\ln \left(\frac{Y_1 - Y_1^*}{Y_2 - Y_2^*} \right)}.$$

8.4. Десорбція адсорбованих продуктів

Однією з основних стадій адсорбційного процесу є десорбція поглинених речовин, яка може проводитися різними способами: підвищенням температури шару адсорбенту, зниженням тиску в системі, віддувом адсорбата в струмині газу-носія, застосуванням вакууму, витіснення сорбату матеріалом, що більш легко адсорбується, комбінація двох і більше вказаних методів.

Як правило, можливість регенерації адсорбенту і виділення адсорбованого забруднення визначається економічними міркуваннями.

Одним з шляхів видалення адсорбованих забруднювачів є повна заміна

адсорбенту з направленням відпрацьованого матеріалу у відходи. Такий шлях можливий в тих випадках, коли кількість адсорбата невелика або процес заміни проводиться достатньо рідко. Вартість свіжого адсорбенту невелика в порівнянні з вартістю процесу регенерації з урахуванням трудових витрат. Адсорбент може знаходитися на паперовому носії або у вставній гільзі. Матеріал, що видаляється, може бути вивезений на звалище; проте в тих випадках, коли адсорбована речовина токсична або канцерогенна і може розчинятися у воді, а також при використанні вугілля як адсорбенту краще відпрацьований матеріал спалювати.

Проблема утилізації або видалення матеріалу, виділеного при адсорбційному очищенні, в значній мірі пов'язана з придатністю цього матеріалу для повторного використання в процесі, проте певну роль може грати і вибір методу десорбції, вживаного для регенерації відпрацьованого сорбенту. Якщо виділена речовина може бути використана в процесі виробництва, то оптимальними методами десорбції можуть бути просте нагрівання або нагрівання при частковому вакуумуванні, оскільки забруднювач при википанні утворює концентровану пару; при конденсації пари утворюється концентрований розчин, який може бути повернений в процес. Якщо одночасно виділяється декілька забруднювачів, наприклад, суміш пари розчинників, і ця суміш не може утилізуватися як така, то необхідне додаткове розподілення, наприклад шляхом дистиляції. Оскільки адсорбцію часто використовують для виділення органічних забруднювачів, то у багатьох випадках виділений матеріал можна використовувати як паливо або добавку до палива, якщо він не знаходить іншого застосування. При спалюванні заміщених вуглеводнів необхідно брати до уваги те, що можливе утворення продуктів, які викликають корозію або що завдають шкоди навколишньому середовищу.

Нагрівання поширене найширше, воно дозволяє отримувати сорбат в концентрованому стані, а в деяких випадках і у стані, придатному для повторного використання. При підвищенні температури адсорбенту до величини, рівній температурі кипіння сорбату при атмосферному тиску, починається википання речовини, пари якої конденсують. Якщо підвищення температури до такого значення призводить до розкладання речовини, то додатково можна застосувати часткове вакуумування. При використанні тільки вакуумування ступінь десорбції не настільки висока, як при нагріванні. Крім того, в цьому випадку для конденсації десорбованого продукту можуть знадобитися ефективніші холодильники або виявиться необхідною конденсація при стисненні.

Десорбція шляхом продування інертного газу, за винятком процесу адсорбційної концентрації з подальшим спалюванням газу, як правило, створює проблем більше, ніж вирішує, оскільки забруднююча речовина в цьому випадку знову виявляється такою, що диспергує в газовому потоці. Продування газом, інертним щодо адсорбційного процесу (наприклад, повітрям або азотом), має недолік в тому, що десорбуюча речовина знову опиняється розподіленою в газовій фазі. Однак в певних ситуаціях застосування цього методу доцільне. Для концентрації забруднюючих речовин, присутніх в дуже малих концентраціях, може бути використана абсорбція. При продуванні повітрям газовий потік, що утворюється при десорбції, може бути безпосередньо направлений на спалювання.

Обробка вугільного адсорбенту водяною парою є методом регенерації, заснованим на витісненні. Водяна пара адсорбується, витісняючи молекули

адсорбата, який має нижчий рівноважний парціальний тиск. Десорбовані забруднення конденсуються разом з надлишком водяної пари. Після насичення адсорбенту парою необхідна регенерація для видалення води; її проводять продуванням гарячого повітря. Обробка водяною парою фактично є комбінацією методів. Хоча основною рушійною силою десорбції є витіснення, пара одночасно підвищує температуру адсорбенту, а його надлишок виконує роль інертного газу, використовуюваного для продування. У випадку органічних матеріалів, добре розчинних у воді, застосування цього методу пов'язане з труднощами, оскільки потрібне проведення додаткового розподілення водного конденсату і органічних продуктів. Навіть у тих випадках, коли розчинність органічних продуктів незначна і розподілення здійснюється простою декантацією фази, що не змішується, необхідно взяти до уваги проблеми, пов'язані з видаленням одержаних водних розчинів. Якщо їх об'єми невеликі, а розчинені органічні речовини піддаються біологічному розкладанню, прийнятним варіантом може бути звичайна обробка в каналізаційних спорудах. Але за наявності стійких органічних сполук або великих кількостей водних розчинів бажано відмовитися від даного методу десорбції.

В процесі регенерації ніколи не досягається абсолютно повна десорбція, тому необхідно передбачати деякий надлишок адсорбційної ємності, що компенсується її втратою за декілька циклів регенерації. При регенерації можуть виникати і інші проблеми, які потрібно передбачати при виборі методу обробки. Деякі органічні сполуки, зокрема, мономері, наприклад пари стиролу, в процесі регенерації можуть полімеризуватися в порах адсорбенту, що робить його непридатним для подальшого використання. При високих температурах регенерації можливий розпад органічних сполук, внаслідок чого сорбент покривається смолою і сажею і також стає неактивним. У таких випадках слід використовувати інші методи десорбції, або працювати при помірних температурах і зниженому тиску, або проводити обробку водяною парою; можлива також регенерація дезактивованого адсорбенту в окислювальній атмосфері печі. У таких печах в контрольованих умовах органічні матеріали випалюють з поверхні і з пор сорбенту.

В результаті хемосорбції сорбат зв'язується настільки міцно, що десорбція можлива тільки при видаленні деякої кількості самого сорбенту. В більшості випадків регенерація проводиться в спеціальних умовах. Прикладом може слугувати регенерація активованого вугілля, використовуюваного для видалення SO_2 , продуванням повітрям. Частина SO_2 постійно накопичується на сорбенті у вигляді сірчаної кислоти. Її десорбують, нагріваючи до 370°C в інертній атмосфері, внаслідок чого кислота реагує з вугіллям, утворюючи CO_2 і SO_2 .

У тих випадках, коли адсорбованими забруднювачами є неорганічні або негорючі речовини і для них не знаходять жодного корисного застосування, проблеми видалення аналогічні тим, які виникають при видаленні подібних матеріалів методами адсорбції.

Розділ 9

Конденсаційне очищення газових викидів

9.1. Використання конденсаційного очищення газів і пари

Конденсаційну обробку відхідних газів зазвичай включають в технологічний цикл, якщо процес супроводжується відчутними втратами проміжних або кінцевих продуктів. Часто за допомогою конденсації вловлюють і повертають в технологічний процес пари розчинників, що видаляються з поверхні виробів після нанесення функціональних, захисних і забарвлюючих шарів. Іноді конденсацію застосовують для вилучення з газового потоку цінних (дорогих) або особливо небезпечних речовин. При економічно і технічно прийнятних параметрах робочого середовища можна перевести в конденсуючий стан пари легкокиплячих сполук (зазвичай використовуваних як розчинники) з концентраціями не нижче 5...10 г/м³. Конденсація більш розбавлених забруднювачів представляє технічно складне завдання і вимагає значних витрат.

Ступінь вловлювання (глибина вилучення) забрудника залежить від ступеня охолодження і стиснення газових викидів. У виробничих умовах температуру і тиск приймають такими, щоб енерговитрати на конденсацію складали незначну частку загальних витрат на технологію. Тому ступінь вилучення навіть дорогих продуктів встановлюють невисокий, як правило, в межах 70...80%. З цієї ж причини використовувати конденсацію як самостійний засіб санітарного очищення (тобто з глибиною вилучення до санітарних норм) неприйнятно.

В той же час конденсаційна обробка може успішно застосовуватися в багатоступінчатих схемах очищення викидів. Існують три напрями в області газоочистки, де конденсація не лише корисна, але і необхідна. Це:

- попереднє осадження основної маси пари забруднювачів перед адсорберами при високому ступені забруднення викидів;
- парціальне вилучення пари, що містить сполуки фосфору, миш'яку, важких металів, галогенів перед термознешкодженням суміші забруднювачів;
- конденсація забруднювачів після хімічної обробки з метою переведення в легкоконденсуючі сполуки, наприклад, після хемосорбційних апаратів.

Конденсація може бути застосована для обробки систем, що містять пари речовин при температурах, достатньо близьких до їх точки роси. Цей метод найбільш ефективний у випадку вуглеводнів і інших органічних сполук, що мають достатньо високі температури кипіння, за звичайних умов і присутніх в газовій фазі у відносно високих концентраціях. Для видалення забруднювачів, що мають достатньо низький тиск пари при звичайних температурах, можна використовувати конденсатори з водним і повітряним охолодженням. Для більш летких розчинників можлива двохстадійна конденсація з використанням водного охолодження на першій стадії і низькотемпературного – на другій. Максимальне зниження вмісту інертних або таких, що не конденсуються газів в оброблюваній суміші дозволяє полегшити проведення процесу конденсації і підвищити її економічну ефективність, оскільки дає можливість виключити необхідність охолодження дуже низьких

температур, відповідних точці роси.

Якщо газ необхідно охолодити до температури, що на 40...50K нижче за точку роси, аби досягти необхідного видалення забруднюючих речовин, то в процесі конденсації в масі газового потоку може розпочатися утворення туману. Розміри частинок цього туману складають зазвичай 1,0 мкм або ще менше, що утруднює вловлювання. Туман утворюється тоді, коли швидкість теплопередачі значно перевищує швидкість масопереносу і основна частина газу охолоджується до температури, лежачої значно нижче точки роси конденсованої пари. Далі у парі виникають центри конденсації і починається процес конденсації крапель в основній масі газового потоку ще до того, як пара досягне холодної поверхні. У конденсаторах з безпосереднім контактом туман утворюється рідко, оскільки маса газу перебуває дуже близько до холодних теплопровідних поверхонь (краплі або плівки рідини). Утворення туману в поверхневих конденсаторах можна передбачити шляхом розрахунку швидкостей тепло- і масопередачі в процесі проходження газу через конденсатор. Якщо маса газового потоку при даній температурі стає перенасиченою, то утворення туману вірогідне. Для запобігання туману слід використовувати конденсацію з безпосереднім контактом. Інший метод полягає в тому, щоб заздалегідь викликати утворення туману і видалити його за допомогою відповідного пристрою (електрофільтр, скрубер Вентурі, відповідні фільтри).

Конденсація може бути застосована для попередньої обробки газів, при якій виділяються цінні розчинники і зменшується кількість забруднювачів перед подальшою стадією обробки. Парціальна конденсація може знайти застосування в тих випадках, коли оброблюваний газ не викидається, а знову повертається в процес або використовується в процесі допалювання. Попередня обробка конденсацією доцільна в тих випадках, коли перед основною обробкою газовий потік необхідно охолодити, наприклад, при здійсненні адсорбції. Розрізняють два види конденсації:

- поверхневу (або просто конденсацію), при якій пара, що конденсується, і охолоджуючий агент розділені стінкою і конденсація пари відбувається на внутрішній або зовнішній поверхні холодної стінки;
- конденсацію зміщенням, при якій пара, що конденсується, безпосередньо контактує з охолоджуючим агентом.

Якщо конденсації піддається пара нерозчинних в охолоджуючому агенті (воді) рідин або пару, що є невикористовуваним відходом того або іншого процесу, охолодження і конденсацію цієї пари можна проводити шляхом безпосереднього зміщення з охолоджуючим агентом (водою).

Ефективність роботи конденсаторів зміщення знаходиться в прямій залежності від поверхні зіткнення охолоджуючого агента і пари, тому поверхню зіткнення збільшують, розпилюючи охолоджуючий агент за допомогою різних пристроїв.

9.2. Принцип конденсаційного очищення

При охолодженні багатокомпонентної газової суміші, що містить звичайні гази, що не конденсуються, охолодження суміші спочатку відбувається за рахунок конвекції, а тепловміст передавальної поверхні (стінка труби в поверхневому конденсаторі або крапля чи плівка холодагенту при безпосередньому контакті) зменшується до тих пір, поки газова фаза не насичується одним або декількома з її

конденсованих компонентів. При додатковому охолодженні конденсовані гази дифундують до теплопередаючої поверхні, де відбувається їх конденсація з виділенням прихованої теплоти. Початкова точка роси або температура насичення для кожного компоненту може бути визначена з кривої залежності температури від тиску пари для даного компоненту при відомій величині його мольної частки в парі:

$$y_A \cdot P = (p_A)_n,$$

де y_A – мольна частка компоненту A в парі;

P – сумарний абсолютний тиск газу;

$(p_A)_n$ – парціальний тиск компоненту A в парі.

Компонент A починає конденсуватися, коли температура газу знижується до температури, при якій компонент A має тиск пари $(p_A) = (p_A)_n$.

Після початку конденсації температура газу знижуватиметься тільки у міру відведення відповідної кількості тепла і прихованої теплоти, внаслідок чого в процесі зниження температури газ залишатиметься насиченим компонентом A .

Оскільки пари речовини A повинні дифундувати до теплопередаючої поверхні, процес контролюється тепло- і масопереносом. У системі, що містить інші компоненти (B , C і так далі), що конденсуються, кожен з цих компонентів почне конденсуватися тоді, коли газ стане насичений цим компонентом, і для нього виконуватиметься співвідношення парціального тиску, аналогічне $(p_A) = (p_A)_n$.

Для визначення температури, до якої потрібно охолодити газ, щоб досягти після обробки необхідного вмісту компоненту A , використовуються наступні рівняння:

$$\begin{aligned} (v_A)_e &= (y_A)_e; \\ (y_A)_e \cdot P &= (p_A)_e \end{aligned}$$

де $(v_A)_e$ – допустима об'ємна частка компоненту A в газових викидах;

$(y_A)_e$ – допустима мольна частка компоненту A у викидах;

P – абсолютний парціальний тиск газу;

$(p_A)_e$ – допустимий тиск пари компонента A .

Необхідна температура газу є температурою, при якій тиск пари компоненту A рівно величині $(p_A)_e$ на кривій тиску пари. У присутності декількох компонентів уловлювання здійснюється по компоненту, що вимагає найбільш низької температури.

9.3. Типи і конструкції конденсаторів

За способом взаємодії охолоджуючого і охолоджуваного середовища конденсатори розділяють на контактні і поверхневі. У контактних конденсаторах охолоджувані гази і холодоносії змішуються, а в поверхневих розділені твердою стінкою.

Контактні апарати по конструкції і методам розрахунку аналогічні пристроям абсорбції.

Конденсація змішення здійснюється в апаратах – конденсаторах змішення. Залежно від способу відведення з апаратів потоків розрізняють мокрі і сухі конденсатори змішення. У мокрих конденсаторах охолоджуючий агент, конденсат і гази (повітря), що не конденсуються, відводять з нижньої частини апарату за

допомогою мокро-повітряного насоса, в сухих охолоджуючий агент з конденсатом відводяться з нижньої частини апарату, а повітря відсмоктується вакуум-насосом з верхньої частини.

Крім того, розрізняють прямоточні конденсатори змішення, в яких охолоджуючий агент і пара рухаються в одному напрямі (зверху вниз), і протиточні, в яких пар і охолоджуючий агент рухаються в протилежних напрямках (агент зверху вниз, а пара від низу до верху).

Поверхневі конденсатори за конструкцією схожі з іншими типами поверхневих теплообмінників – підігрівачами, холодильниками, випарниками.

Кожухотрубчасті конденсатори можуть компонуватися вертикально або горизонтально. Конденсовані гази зазвичай направляють в їх міжтрубний, а холодносії – в трубний простір.

Найбільш простими є конденсатори типу “труба в трубі” (рис. 9.1, *a*), які виготовляються по нормалях або індивідуальних проектах.

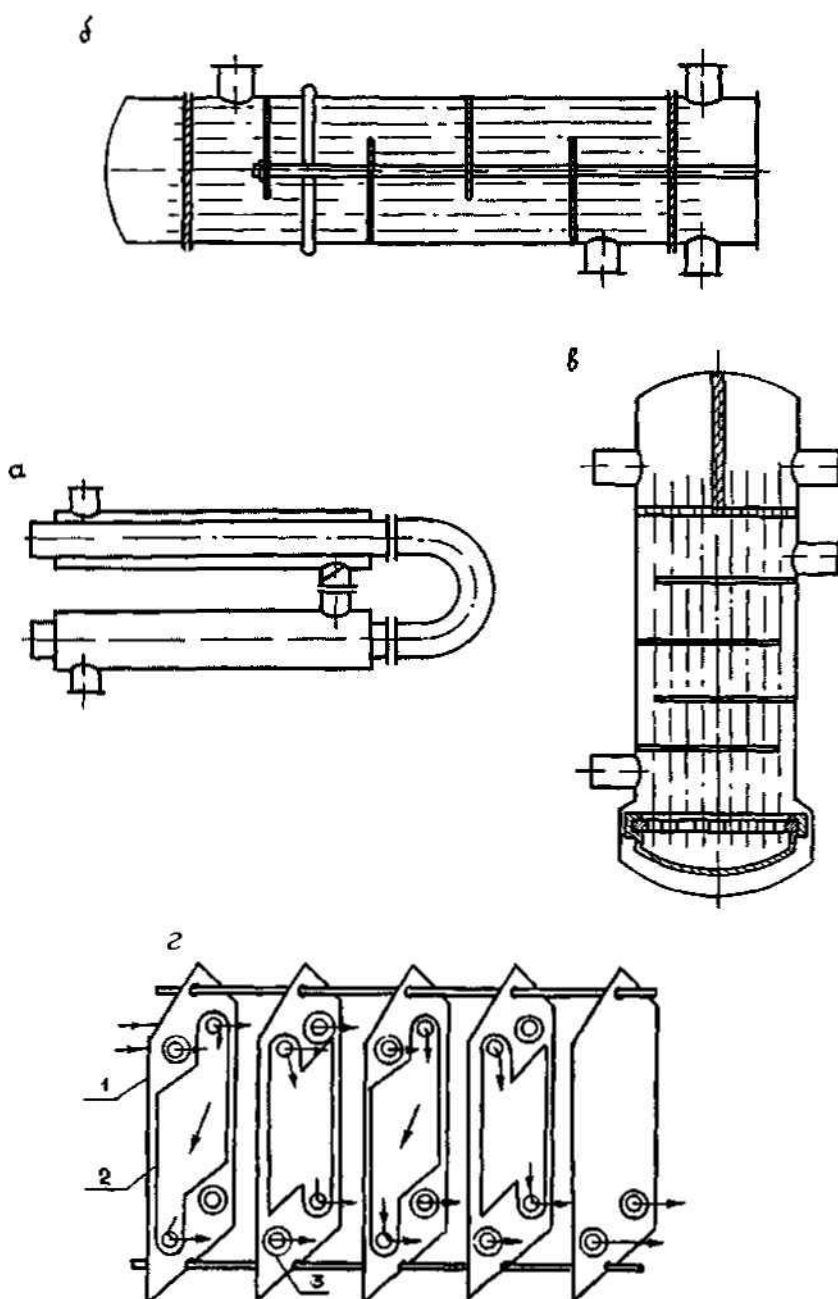


Рис. 9.1. Конструкції теплообмінників-конденсаторів

Багатотрубні конденсатори складніші за конструкцією і мають два різновиди:

- тип Н (з нерухомою решіткою) призначений для умов, що не вимагають компенсації температурної напруги;
- тип К (рис. 9.1, б) має лінзовий компенсатор на кожусі.

Ще досконаліші, але досить складні конструктивно конденсатори з плаваючою головкою (рис. 5.1, в). Теплообмінники з U- і W-подібними трубками мають хороші компенсаційні показники і простіші за будовою, але як конденсатори їх не застосовують.

Для апаратів типу Н залежно від матеріалу, діаметру і тиску допускається максимальна різниця температур охолоджуючого і охолоджуваного середовищ 20...60°C. При більшій різниці температур застосовують апарати типу К або з плаваючою головкою. Максимальний тиск для конденсаторів типу К складає 1,6 МПа, а для конденсаторів з плаваючою головкою до 1 МПа в трубному і 1...2,5 МПа в міжтрубному просторі. Всі елементи кожухотрубчастих конденсаторів (труби, перегородки, кожух і ін.) можуть виготовлятися з вуглецевих або легированих сталей.

Пластинчасті конденсатори простіші у виготовленні, мають менші опори і менш металоємні. Пакетні пластинчасті теплообмінники виготовляють з тонких металевих листів у вигляді багатшарових розбірних, напіврозбірних або нерозбірних пакетів. У розбірних конструкціях (рис. 9.1, г) пластини 1 збираються на стяжних пристроях з герметизацією за допомогою великих 2 і малих 3 прокладок із термостійкої гуми. У напіврозбірних або нерозбірних конструкціях пластини частково або повністю з'єднуються на зварюванні. Розбірні конструкції використовуються при робочому тиску до 1 МПа в межах температур -20...+180°C, зварні, – при тиску до 4 МПа і температурах -100...+300°C.

Найчастіше для конденсації використовуються кожухотрубчасті і пластинчасті конструкції.

9.4. Розрахунок конденсаторів

Розрізняють конструктивний і перевірочний розрахунки конденсаторів. Конструктивний розрахунок визначає геометричні розміри (в першу чергу площу поверхні теплообміну). Перевірочний розрахунок має на меті визначення витрат і температурних режимів теплоносіїв для заданого типорозміру теплообмінника. Умови застосування деяких теплоносіїв наведені в додатку .

Витрата охолоджуючого агента на конденсацію пари в конденсаторі змішення визначається з теплового балансу конденсатора:

$$D \cdot H + W \cdot c_o \cdot t_{o.n} = (D + W) \cdot c_{cm} \cdot t_{cm},$$

звідки

$$W = \frac{D \cdot (H - c_{cm} \cdot t_{cm})}{c_{cm} \cdot t_{cm} - c_o \cdot t_{o.n}},$$

де D – кількість пари, що конденсується, кг/с;

H – ентальпія пари, що конденсується, Дж/кг;

W – витрата охолоджуючого агента, г/с;

c_o – теплоємність охолоджуючого агента, Дж/(кг.град);

$t_{o.n}$ – початкова температура охолоджуючого агента, °C;

c_{cm} – теплоємність суміші конденсату з охолоджуючим агентом, Дж/(кг·град);

t_{cm} – температура суміші конденсату охолоджуючого з агентом, °С.

Наявність повітря в парі різко знижує коефіцієнт тепловіддачі при конденсації пари і, отже, продуктивність апарату. Тому повітря повинно безперервно відсмоктуватися з конденсатора.

Кількість повітря (кг/с), що відсмоктується з конденсатора змішення, складає:

$$G_B = 0,000025 \cdot (D + W) + 0,01 \cdot D.$$

Кількість повітря, що відсмоктується з поверхневого конденсатора, рівна:

$$G_B = 0,000025 \cdot D + 0,01 \cdot D \approx 0,01 \cdot D$$

Об'єм повітря (м³/с), що відсмоктується з конденсатора, визначається за рівнянням стану:

$$V_n = \frac{288 \cdot G_n \cdot (273 + t_n)}{p_n}$$

де 288 – газова постійна для повітря, Дж/(кг·К);

t_n – температура повітря, що відсмоктується з конденсатора, °С;

$p_n = (p - p_{\text{пару}})$ – парціальний тиск повітря, що відсмоктується, Па;

p – загальний тиск в конденсаторі, Па;

$p_{\text{пару}}$ – парціальний тиск пари в повітрі, що відсмоктується, Па, яке приймається рівним тиску насиченої пари при температурі t_n .

Температура повітря, що відсмоктується з конденсатора t_n приймає різні значення в конденсаторах різних типів.

Для мокрих конденсаторів змішення температура повітря приймається рівною температурі суміші охолоджуючого агента з конденсатом при виході із конденсатора: $t_n = t_{cm}$.

Для поверхневих конденсаторів температура повітря приймається рівною температурі суміші охолоджуючого агента при вході в конденсатор: $t_n = t_{o.n.}$

Поверхневі конденсатори для обробки концентрованої, насиченої однокомпонентної пари проектують відповідно до стандартних інженерних підходів, характерних для процесів теплопередачі, де потік теплопередачі Q/F , що виражається у ватах на 1 м² є:

$$\frac{Q}{F} = K_t \cdot \Delta t_m,$$

де Q – потік тепла, Дж/с;

F – поверхня теплопередачі, м²;

Δt_m – середнє значення термічної рушійної сили між парою, що конденсується, і холодагентом, град;

K_t – сумарний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·град), що є складною величиною, в яку входять коефіцієнти для плівки з того боку, де відбувається конденсація; для плівки з боку холодагента; теплопровідність розділяючої стінки, а також компоненти, що дозволяють враховувати можливі перешкоди теплопередачі.

У загальному випадку в поверхневий конденсатор надходить перегріта пара. Дуже часто охолоджуючим агентом є вода.

Ентальпію перегрітої пари, що надходить, можна виразити як:

$$H = c_n \cdot (t_n - t_{\text{нас}}) + r + c_p \cdot t_{\text{нас}}$$

і представити тепловий баланс процесу у вигляді рівності:

$$D \cdot H + W \cdot c_o \cdot t_{e.n} = D \cdot c_p \cdot t_p + W \cdot c_o \cdot t_{e.k} + Q_e$$

де H – ентальпія пари, що поступає, Дж/кг;
 c_n – теплоємність перегрітої пари, Дж/(кг град);
 t_n – температура перегрітої пари, що надходить °С;
 $t_{нас}$ – температура насичення (конденсації) пари °С;
 r – теплота конденсації пари (теплота випаровування рідини), Дж/кг;
 $c_{ж}$ – теплоємність конденсату, Дж/(кг град);
 D – кількість пари, що поступає в конденсатор, кг/с;
 W – кількість охолоджуючого агента (води), кг/с;
 c_o – теплоємність охолоджуючого агента (води), Дж/(кг.град);
 $t_{o,n}$ – початкова температура охолоджуючого агента (води), °С;
 t_p – температура конденсату на виході з апарату °С;
 $t_{o,k}$ – кінцева температура охолоджуючого агента (води), °С;
 Q_{ϵ} – втрати тепла в навколишнє середовище, Дж/с.

З цієї рівності визначається витрата охолоджуючого агента (води):

$$W = \frac{D \cdot (H - c_p \cdot t_p) - Q_{\epsilon}}{c_o \cdot (t_{o,k} - t_{o,n})}.$$

За умовами теплообміну охолоджуюча поверхня конденсатора ділиться на три зони:

- зону охолодження перегрітої пари;
- зону конденсації;
- зону охолодження конденсату.

В результаті цього поверхні охолодження доводиться знаходити для кожної зони окремо. Для їх визначення необхідне обчислення кількості тепла, що передається через поверхню охолодження в кожній зоні, і проміжних температур охолоджуючого агента t_{o1} і t_{o2} .

Кількість тепла, що передається через поверхню охолодження в кожній із зон, знаходять з наступної рівності:

- для зони охолодження перегрітої пари

$$Q_{on} = D \cdot c_n \cdot (t_n - t_{нас}) = W \cdot (t_{o,k} - t_{o2});$$

- для зони конденсації

$$Q_k = D \cdot r = W(t_{o2} - t_{o1});$$

- для зони охолодження конденсату

$$Q_{ок} = D \cdot c_p \cdot (t_{нас} - t_p) = W \cdot (t_{o1} - t_{o,n}).$$

З вище наведених рівностей визначаються проміжні температури охолоджуючого агента:

$$t_{o1} = t_{o,n} - \frac{Q_{o,k}}{W};$$

$$t_{o2} = t_{o,k} - \frac{Q_{o,n}}{W}.$$

Проте ці методи проектування непридатні, якщо присутні навіть відносно невеликі кількості неконденсованого газу. Коли відбувається поверхнева конденсація пари з газів, що не конденсуються, необхідні спеціальні методи, що враховують масо- і теплопередачу. В цьому випадку використовується проектування з використанням методу проб і помилок.

Інженерні методики розрахунку пристроїв для конденсації багатоконпонентної пари з потоку газів, що не конденсуються, в даний час відсутні.

Наближені розрахунки конденсаторів для обробки газових викидів можуть виконуватися за наступною схемою.

1. За заданими концентраціями пари забруднювачів і температурі t газових викидів вираховують парціальний тиск інгредієнтів, оцінюють їх агрегатні стани, визначають можливість застосування в розрахунках законів ідеальних або реальних газових сумішей, інших термодинамічних співвідношень.

2. Визначають масові G_z і об'ємні V_z витрати відхідних газів в цілому і по інгредієнтах: повітря – (G_n, V_n) , димових газів (G_d, V_d) , компонентів забруднювачів (G_{zi}, V_{zi}) .

3. Задаються температурні характеристики процесу. На відміну від конденсації однокомпонентної пари температура конденсації пари суміші речовин не залишається постійною унаслідок зміни концентрацій інгредієнтів. Облік характеристик всіх компонентів значно збільшує трудомісткість розрахунків, і тому при виборі початкової t_n і кінцевої t_k температур конденсації можна дотримуватися наступних рекомендацій.

Якщо у складі забруднювачів можна виділити основний компонент, кількість якого складає не менше 75...90% від їх маси (нижня межа – для сумішей, що містять близькі за властивостями компоненти), t_n можна прийняти за властивостями основного компоненту, а наявність решти компонентів враховувати адитивним коректуванням його фізико-хімічних властивостей.

Якщо ж компоненти суміші забруднювачів мають приблизно однакові концентрації і всі підлягають видаленню, розрахунки слід проводити по найменш сприятливому варіанту, прийнявши в якості розрахункових компоненти з найменшою температурою конденсації.

Кінцеву температуру конденсації t_k приймають за кінцевим парціальним тиском розрахункового компоненту, що відповідає необхідному повному η або парціальному η_i ступеню очищення.

За значеннями t_n і t_k підбирають вид холодоносія, задають його початкову t_1 і кінцеву t_2 температури, приймаючи орієнтування t_1 на 5...10°C нижче t_k а t_2 – на 5...12°C вище t_1 . Потім вибирають тип, компоновку апарату і уточнюють схему руху потоків (протитечія або перехресний потік).

У типових розрахунках конденсаторів для пари індивідуальних речовин вибору схем руху потоків не приділяється особливого значення зважаючи на сталість температури конденсації. Якщо конденсуються тільки окремі компоненти потоку газової суміші, то напрями потоків холодоносія і відхідних газів істотно впливають на процес, оскільки температура конденсації безперервно знижується внаслідок зменшення кількості компонентів, що видаляються. При невисокій концентрації пари, що конденсується, процес більшою мірою визначається теплообміном холодоносія і газового потоку, аніж тепловіддачею від забруднювачів, що конденсуються.

Найбільш вигідною схемою руху потоків є протитечія або багатократний перехресний потік.

4. Визначають кількість тепла, що відводиться від відхідних газів при конденсації пари забруднювачів.

Як правило, відхідні гази поступають на конденсаційну обробку з температурою, відповідною перегрітому стану пари забруднювачів. Охолодження

таких газів завжди супроводжується конденсацією деякої частини пари на поверхнях теплообміну ще до досягнення температури насичення всього об'єму. Проте математичних залежностей для обліку цього явища немає, і тому для вирішення завдання доводиться спрощено ділити процес на дві стадії: охолодження газового потоку без конденсації від заданої температури $t_{2,n}$ до температури початку конденсації t_n і подальше охолодження з конденсацією до температури t_k .

Кількість тепла, Вт, що відводиться на першій (Q_I) і другій (Q_{II}) стадіях, складе:

$$Q_I = \left(G_n \cdot c_{p,n} + \sum_{i=1}^N G_{zi} \cdot c_{p,i} \right) \cdot (t_{2,n} - t_n);$$

$$Q_{II} = \left(G_n \cdot c_{p,n} + \sum_{i=1}^N G_{zi} \cdot c_{p,i} \right) \cdot (t_n - t_k) + \sum_{i=1}^N G_{zi} \cdot I_{zi} \cdot \eta_i,$$

де $c_{p,n}$, $c_{p,i}$ – середні теплоємності повітря (або частини відхідних газів, що не конденсується) і пари забруднювачів, Дж/(кг·К);

$I_{z,i}$ – середня ентальпія конденсації i -того компонента пари забруднювачів, Дж/кг;

η_i – глибина витягання i -того компонента забруднювачів (у долях);

N – число компонентів забруднювачів, що конденсуються.

5. Знаходять наближене значення проміжної температури t_{nk} , розподіливши температурний перепад $(t_2 - t_1)$ пропорційно величинам Q_I і Q_{II} (див. рис. 9.2).

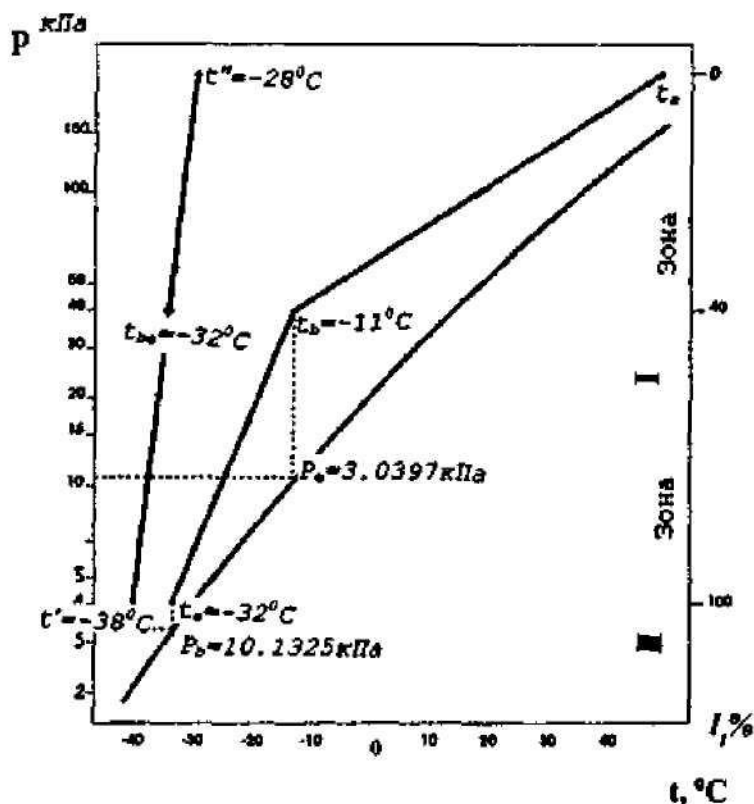


Рис. 9.2. Залежність тиску насиченої пари від температури

Потім визначають значення середньологарифмічних температурних напорів Δt_{mI} , Δt_{mII} на першій і другій стадіях обробки викидів

$$\Delta t_{m(II)} = \frac{\Delta t_{\delta I(II)} - \Delta t_{mI(II)}}{\ln(\Delta t_{\delta I(II)} - \Delta t_{mI(II)})},$$

$\Delta t_{\delta I}$, $\Delta t_{\delta II}$, Δt_{mI} , Δt_{mII} – вищі і нижчі різниці температур, °С, що визначаються із

співвідношень:

$$\Delta t_{\delta I} = t_1 - t_2; \Delta t_{mI} = \Delta t_{\delta II} = t_n - t_{nk}; \Delta t_{mII} = t_k - t_1.$$

Попередні значення початкових $t_{n.cm}$ і кінцевих $t_{k.cm}$ температур поверхні теплообміну з боку забруднювачів, що конденсуються, приймають за виразом:

$$\Delta t_{n(k)cm} = t_{n(k)} - \frac{\Delta t_{\delta II}}{2}.$$

6. Приймавши за дослідними даними орієнтовні значення коефіцієнтів теплопередачі на першій (K_I) і другій (K_{II}) стадіях обробки, визначають заздалегідь величини площ теплообміну:

$$F_I = \frac{Q_1}{K_I \cdot \Delta t_{mI}}; F_{II} = \frac{Q_{II}}{K_{II} \cdot \Delta t_{mII}}.$$

За відсутності відповідних дослідних даних можна приймати орієнтовні значення коефіцієнтів теплопередачі $K_I=20...50$ Вт/(м²·К) і $K_{II}=100...150$ Вт/(м²·К).

Подальша схема розв'язку задачі залежить від співвідношення площ теплообміну F_I і F_{II} . Розглянемо можливі варіанти для деяких конкретних ситуацій.

Якщо вміст пари забруднювачів в газових викидах високий і $F_I/F_{II} < 0,1$, то підбір типорозміру конденсатора проводять за сумарною площею теплообміну $F_I + F_{II}$ і виконують його уточнений розрахунок за типовою методикою розрахунку конденсаторів чистої пари з емпіричною поправкою на коефіцієнт теплопередачі, що враховує присутність газів, що не конденсуються (див. рис. 9.3).

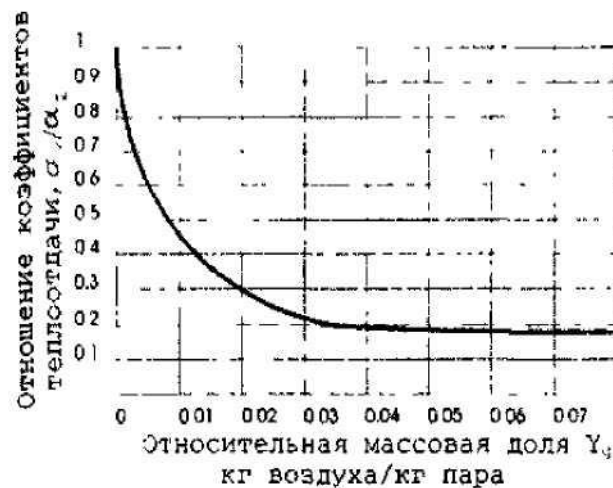


Рис. 9.3. Співвідношення коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації пари, забрудненої повітрям (α_1) і чистої пари (α_2)

При невисокому вмісті пари забруднювачів в газових викидах і $F_{II}/F_I < 0,1$ типорозмір конденсатора також підбирають за сумарною площею теплообміну, а уточнений розрахунок виконують за типовою методикою для газо- або повітрянагрівачів (охолоджувачів) поверхневого типу, не враховуючи процес конденсації.

Якщо площі F_{II} і F_I співставні, доводиться приймати модель двоступінчатої обробки з автономним розрахунком кожного ступеня теплообмінника. У такому разі для ступеня охолодження газів до температури початку конденсації можна використовувати типову методику розрахунку поверхневих повітроохолоджувачів. При цьому спрощено передбачається, що процес конденсації пари забруднювачів з

повітря відбувається тільки на другому ступені, який розраховують як самостійний конденсатор. Методика уточненого розрахунку, що приводиться далі, відноситься тільки до стадії конденсаційної обробки.

7. Визначають середню величину теплового потоку q , Вт/м², від відхідних газів до поверхні конденсації:

$$q = \alpha_1 \cdot \Delta t_1 + \sum_{i=1}^N I_{zi} \cdot \beta_i \cdot \frac{\rho_{ni} - \rho_{ki}}{2},$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

$\Delta t_1 = (t_n - t_k)/2$ – середня різниця температур, °С;

β_i – коефіцієнти масовіддачі інгредієнтів, що конденсуються, м/с;

ρ_{ni} , ρ_{ki} – початкові і кінцеві концентрації (густини) забруднювачів, що конденсуються, кг/м³;

I_{zi} – ентальпія випаровування (конденсації) i -того компонента забруднювача.

Для стаціонарного процесу теплопередачі справедлива рівність:

$$q = \alpha_2 \cdot \Delta t_2$$

де α_2 – коефіцієнт теплопередачі через плівку конденсату, Вт/(м² К);

Δt_2 – середня різниця температур на межах плівки конденсату, що підраховується за співвідношенням:

$$\Delta t_2 = \frac{(t_n - t_k)}{2} - \frac{(t_{n,cm} - t_{k,cm})}{2}.$$

В наближених розрахунках для коефіцієнта масовіддачі можна скористатися виразом, отриманим в дослідях із конденсацією водяної пари з повітря на горизонтальних трубах:

$$Nu = -0,5 Re^{0,5} \cdot \varepsilon^{0,6} \cdot p_e^{0,33},$$

де $Re = w \cdot l \cdot \rho / \mu$ – число Рейнольдса;

w – визначальна швидкість, м/с;

l – визначальний розмір, м;

ρ , μ – густина, кг/м³, і динамічна в'язкість, Па·с, парогазового потоку;

ε – початковий вміст повітря в парогазовій суміші (у об'ємних долях);

$p_e = \Delta p / P$ – відносний тиск, рівний відношенню перепаду тиску Δp пари в процесі конденсації до загального абсолютного тиску в системі P .

У вище наведеному виразі визначальний розмір l – це зовнішній діаметр трубки конденсатора; визначальна швидкість w – середня швидкість парогазової суміші в міжтрубному просторі. Фізичні параметри розраховують за середньою температурою парогазового потоку біля поверхні конденсації (практично за середньою температурою поверхні конденсації без урахування стрибка температур).

При конденсації водяної пари з повітря коефіцієнт динамічної в'язкості знаходять із співвідношення:

$$\mu = \frac{(1 - \varepsilon) \cdot \mu_{en} + 1,6 \cdot \varepsilon \cdot \mu_n}{1 + 0,6 \cdot \varepsilon},$$

де μ_{en} , μ_n – коефіцієнти динамічної в'язкості водяної пари і повітря, Па·с.

Коефіцієнти масовіддачі інгредієнтів, що конденсуються, пов'язані з числом Нуссельта Nu таким співвідношенням:

$$\beta_i = \frac{Nu \cdot D_i}{l},$$

де D_i – коефіцієнти дифузії компонентів пари забруднювачів, м²/с.

Отримане значення числа Нуссельта Nu доводиться використовувати також для знаходження коефіцієнта тепловіддачі α_1 . Хоча підставою цьому і служить принцип аналогії, згідно якому схожі процеси тепло- і масообміну повинні описуватися схожими виразами, необхідно приймати зменшені на 15...20% значення Nu , створюючи тим самим запас поверхні теплообміну для деякої компенсації можливих прорахунків:

$$\alpha_1 = \frac{(0,80...0,87) \cdot Nu \cdot \lambda}{l}.$$

У цьому виразі коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К), можна обчислювати за принципом адитивності при середній температурі парогазової суміші.

Коефіцієнт теплопередачі α_2 через плівку конденсату до зовнішньої поверхні труби можна визначати за рівнянням Нуссельта, яке для випадку конденсації суміші пари забруднювачів можна представити в наступному вигляді:

$$\alpha_2 = C \cdot \left(\frac{\rho_{cm}^2 \cdot \lambda_{cm}^3 \cdot g}{\mu_{cm} \cdot \Delta t_2 \cdot L} \cdot \sum_{i=1}^N I_{zi} \cdot \nu_i \right)^{1/4}.$$

Тут C – чисельний множник, рівний 0,943 для вертикального і 0,728 для горизонтального розташування труб, L – визначальний розмір, м, в якості якого приймається висота H , м, труб при вертикальному або зовнішній діаметр D , м, труб при горизонтальному розташуванні конденсатора.

Фізичні параметри рідкої суміші ρ_{cm} , кг/м³, λ_{cm} , Вт/(м·К), μ_{cm} , Па·с, що складається з N компонентів забруднювачів, що сконденсувалися, знаходять, опираючись на дослідні дані, або підраховують за емпіричними залежностями. За відсутності емпіричної інформації для конкретних складів сумішей обчислюють їх параметри по адитивності. Для цього характеристики індивідуальних речовин, що входять до складу суміші, що сконденсувалася, можна приймати за середньою температурою плівки конденсату t_m , а частку внеску кожного компоненту у формування шуканої характеристики суміші вважати рівною ступеню її вилучення з газової фази. Значення t_m знаходять із співвідношення:

$$t_m = \frac{t_n + t_k + t_{cm,n} + t_{cm,k}}{4} = \frac{t_n + t_k}{2} - \frac{\Delta t_{mII}}{4}.$$

Для підрахунку α_2 можуть бути використані також модифіковані формули, що додатково враховують ті або інші особливості процесу теплообміну. Так, змінність фізичних властивостей конденсату внаслідок неізотермічності враховують, множачи величину α_2 на температурну поправку ε_t :

$$\varepsilon_t = \left[\left(\frac{\lambda_{cm}}{\lambda} \right)^3 \cdot \frac{\mu}{\mu_{cm}} \right]^{0,125}$$

де λ_{cm} , μ_{cm} – коефіцієнти теплопровідності, Вт/(м·К), і динамічної в'язкості, Па·с, конденсату при температурі стінки;

λ , μ – те ж саме, при середній температурі плівки конденсату.

Для випадку конденсації суміші пари забруднювачів рівняння Нуссельта з обліком кількості труб в пучках n і інтенсифікацію теплообміну при хвилеутворенні в ламінарно текучій плівці конденсату можна представити у вигляді:

$$\alpha_2 = C \cdot \lambda \cdot \left(\frac{\rho_{cv}^2 \cdot n \cdot l}{\mu_{cm} \cdot \sum_{i=1}^N \eta_i \cdot G_{zi}} \right)^{1/3}$$

Коефіцієнт C в цьому виразі рівний 3,78 для вертикального і 1,41 (при $n \leq 100$) або 1,21 (при $n > 100$) для горизонтального розташування труб. За визначальний розмір l , м, приймають зовнішній діаметр вертикальних або довжину горизонтальних труб.

8. Якщо величини теплових потоків розрізняються більш ніж на 10...15%, то необхідно задаватися іншими характерними температурами і виконувати розрахунки до ув'язки теплових потоків.

Оскільки початкова і кінцева температури поверхні конденсації жорстко пов'язані із заданими значеннями концентрацій забруднювачів на вході і виході, залишається можливість варіювання температурами холодоносія і стінки. Можна рекомендувати при значних розбіжностях змінювати початкову і кінцеву температури холодоносіїв, а при невеликих – температури стінки. При перерахунку α_1 , β_i , α_2 фізичні параметри також перераховують для нових інтервалів температур.

9. Визначають суму термічних опорів $\sum_{i=1}^N \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ м²·К/Вт стінки труби з відкладеннями на зовнішній і внутрішній поверхні, де δ_i – товщина стінки і шарів відкладень, м, і величину коефіцієнта тепловіддачі α_3 , Вт/(м²·К), від внутрішньої стінки труби до холодоносія.

Орієнтовні значення термічних опорів шарів забруднень для деяких видів омиваючих середовищ представлені в додатку, а коефіцієнти теплопровідності ряду металів і сплавів – в додатку.

Критеріальні залежності для визначення числа Nu і знаходження з нього коефіцієнта тепловіддачі α_3 підбирають з урахуванням руху холодоносія в трубах:

- для турбулентного режиму $Re > 10^4$

$$Nu = 0,0021 \cdot Re^{0,2} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25},$$

- для перехідного режиму $2300 < Re < 10000$

$$Nu = n \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25},$$

- для ламінарного режиму без урахування гравітаційних сил ($Re < 2300$, $Gr \cdot Pr < 8 \cdot 10^5$)

$$Nu = 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25},$$

- для ламінарного режиму з урахуванням гравітаційних сил ($Re < 2300$, $Gr \cdot Pr > 8 \cdot 10^5$)

$$Nu = 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Gr}{Pr} \right)^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25},$$

де $Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu}$ – критерій Грасгофа;

$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$ – критерій Прандтля;

β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини, K^{-1} ;

Δt – різниця температур рідини і стінки, K ;

l – визначальний розмір, m ;

n – інтерполяційний коефіцієнт.

За визначальний розмір приймають внутрішній діаметр трубок конденсатора, m , а за визначальну швидкість – середню швидкість руху потоку в трубках, що розраховується за співвідношенням:

$$w_{mp} = \frac{Q_{II}}{\rho \cdot c_p \cdot (t_{nk} - t_1) \cdot f_{mp}},$$

де f_{mp} – площа трубного простору конденсатора, m^2 ;

ρ , c_p – щільність, kg/m^3 , і теплоємність, $DJ/(kg \cdot K)$, холодоносія при його середній температурі.

Фізичні параметри холодоносія для підрахунку чисел Re , Pr , Gr також приймаються при його середній температурі, а для підрахунку числа Pr_{cm} – по середній температурі внутрішньої стінки, яку орієнтовно можна прийняти на $3...5^\circ C$ нижче за середню температуру зовнішньої поверхні теплообміну.

Значення коефіцієнта n , запропоновані різними авторами, в основному знаходяться в межах, наведених в додатку.

10. Використовуючи величину α_2 , отриману після ув'язки потоків (п. 8), а також розраховані в п. 9 значення $\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ і α_3 , обчислюють коефіцієнт теплопередачі від конденсату до холодоносія:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \sum_{i=1}^3 \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_3}}.$$

Потім знаходять уточнене значення середньологарифмічного температурного натиску Δt_{mII} для другої стадії обробки газових викидів з урахуванням ув'язки теплових потоків (п. 8) і підраховують величину теплового потоку від плівки конденсату до холодоносія:

$$q = K \cdot \Delta t_{mII}.$$

Якщо результат розрахунку відрізняється від пов'язаних в п. 8 величин теплових потоків більш ніж на $10...15\%$, то необхідно знову змінити температури холодоносія і виконувати перерахунок до ув'язки.

11. Після ув'язки визначають сумарний коефіцієнт теплопередачі від парогазової суміші до холодоносія для другої стадії обробки:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{K}}.$$

Потім знаходять уточнене значення необхідної площі теплообміну конденсатора F_{II} . Якщо вона перевищує площу теплообміну конденсатора, вибраного для попереднього розрахунку (див. п. 6), то підбирають більший типорозмір апарату і вносять до розрахунків необхідне коректування.

Якщо уточнена величина виявилася набагато нижчою від прийнятої в попередніх розрахунках, можна за допомогою перевірного розрахунку знайти

економічніші режими температур холодоносія.

12. Після завершення теплового розрахунку апарату переходять до гідравлічного розрахунку, який виконують за звичайною методикою: знаходять за довідковими даними опори міжтрубного і трубного простору і обчислюють втрати тиску потоків газових викидів і холодоносія, а потім за відомою витратою потоків і необхідним напором підбирають пристрої і насоси дуття.

Розділ 10

Термокаталітична і термічна очистка газових викидів

10.1. Термокаталітична очистка газових викидів

Термоокислення газоподібних забруднювачів може відбуватися в газовій фазі (в об'ємі) або на межі розподілу фаз (на поверхні). Газофазовий процес здійснюють безпосередньою вогняною обробкою (спалюванням в полум'ї) газових викидів при температурах, що перевищують температуру займання горючих компонентів викидів. Для організації процесу окислення на межі розподілу фаз використовують каталізatori – конденсовані речовини, здатні за рахунок активності поверхневих частинок прискорювати процес окислення того або іншого забруднювача при температурах нижче за температуру займання. На поверхні каталізатора в результаті його взаємодії з компонентами викидів (в тому числі і з шкідливими домішками) утворюються проміжні сполуки, які вступають в подальші хімічні перетворення з відновленням первинного хімічного складу каталізатора та зв'язуванням (перетворенням) шкідливих речовин у нешкідливі сполуки. Ці процеси мають характер багаторазових повторюваних циклів.

Збудження або зміна швидкості хімічних реакцій під впливом каталізаторів називається каталізом. Розрізняють гомогенний та гетерогенний каталіз. При гомогенному каталізі каталізатор і реагуючі речовини утворюють однорідну систему. При гетерогенному каталізі каталізатор та реагуючі речовини знаходяться в різних агрегатних станах. Каталітичні методи очистки газів засновані на гетерогенному каталізі і слугують для перетворення домішок на нешкідливі або такі, що легко видаляються з газу сполуки. Процеси гетерогенного каталізу протікають на поверхні твердих тіл – каталізаторів. Каталізatori повинні володіти певними властивостями: активністю, пористою структурою, стійкістю до отрут, механічною міцністю, селективністю, термостійкістю, низьким гідравлічним опором, мати невелику вартість.

Особливість процесів каталітичного очищення газів полягає в тому, що вони протікають при малих концентраціях домішок, що видаляються. Основною перевагою методу є те, що він дає високий ступінь очищення, а недоліком – утворення нових речовин, які треба видаляти з газу адсорбцією або абсорбцією. За допомогою термокаталітичного окислення можливе знешкодження водню H_2 , оксиду вуглецю CO , вуглеводнів C_mH_n і кисневих похідних вуглеводнів $C_mH_nO_p$ тільки в газоподібному стані.

Термокаталіз неприйнятний для обробки газів (пари) високомолекулярних і висококиплячих сполук, які, погано випаровуючись з каталізатора, коксується і “отруюють” його, тобто заповнюють активну поверхню продуктами сажі неповного окислення.

Температурний рівень процесу термокаталітичного окислення складає діапазон $350...500^{\circ}C$, що вимагає відповідних витрат палива.

Фізико-хімічні основи термокаталітичного окислення органічних забруднювачів досить складні і мало вивчені. Сьогодні є загальні уявлення про

окремі стадії процесу і їх послідовності: дифузія молекул забруднювача і окислювача до поверхні каталізатора і їх сорбція передують активації початкових молекул на поверхні; активовані молекули піддаються ланцюгу різних змін, перетворюючись на радикали, вступаючи в реакції і утворюючи нові сполуки; останні переходять на поверхні із збуджених станів в основні (стабільні), скидаючи надлишки енергії поверхневим частинкам, і потім можуть віддалитися в газову фазу, десорбуючись з поверхні каталізатора. Практичних методів розрахунку стадій термокatalітичного окислення в сукупності або окремо немає, і апарати знешкодження для кожного виду викидів розробляються індивідуально на основі експериментальних досліджень.

Як каталізатори зазвичай використовують метали або оксиди металів. Найкращі каталізатори розробляються на основі благородних металів, а серед інших найбільш активними є каталізатори з оксидів кобальту, хрому, заліза, марганцю, нікелю і ін. Проте вони мають меншу активність, аніж каталізатори з благородних металів, а також низьку хімічну і термічну стійкість.

Зазвичай активуючі компоненти наносяться на нейтральні термостійкі носії (фарфор або шамот у вигляді пігулок, кульок, гранул; сітки з ніхромового дроту). Каталізатори підбирають індивідуально для кожного конкретного випадку, враховуючи їх вартість, фізико-хімічні властивості і концентрації забруднювачів, об'єми викидів, присутність каталізаторних отрут, інші умови. Універсальних каталізаторів не існує.

Розрізняють три основні області протікання каталітичних процесів: кінетичну, зовнішньодифузійну і внутрішньодифузійну. Залежно від стадії, лімітуючої загальну швидкість процесу, використовуються різні рівняння кінетики процесу.

У зовнішньодифузійної області швидкість реакції визначається швидкістю перенесення компоненту до поверхні зерен каталізатора:

$$\frac{1}{F_q} \cdot \frac{d \cdot G_A}{d \cdot \tau} = \beta_z \cdot (C_A - C_{A_p})$$

де F_q – зовнішня поверхня частинки каталізатора;

β_z – коефіцієнт масовіддачі;

C_A , C_{A_p} – концентрації компоненту A в газовому потоці і його рівноважна на поверхні частинки каталізатора відповідно.

В області хімічної кінетики швидкість незворотньої (зворотньої) реакції першого порядку визначається за рівняннями:

$$r_A = k \cdot C_{A_p} \text{ або } r_A = k \cdot (C_A - C_{A_p})$$

Для незворотньої реакції n -го порядку рівняння має вигляд:

$$r_A = k \cdot C_A^n$$

Для внутрішньодифузійної області і реакції першого порядку сумарну швидкість каталітичного процесу знаходять, комбінуючи рівняння масопередачі із рівнянням дифузії і реакції всередині частинки:

$$\frac{1}{V_q} \cdot \frac{d \cdot G_A}{d \cdot \tau} = k \cdot C_{A0} \cdot \Theta$$

Для частинок каталізатора циліндричної форми отримують:

$$-\frac{1}{F_q} \cdot \frac{d \cdot G_A}{d \cdot \tau} = \frac{1}{\frac{F_q}{k \cdot \Theta \cdot V_q} + \frac{1}{\beta_z}} \cdot C_{AO}$$

або

$$\frac{1}{V_q} \cdot \frac{d \cdot G_A}{d \cdot \tau} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_z} + \frac{V_q}{\beta_z \cdot F_q}} \cdot C_{AO},$$

Для кулястих частинок радіусом r :

$$-\frac{1}{F_q} \cdot \frac{d \cdot G_A}{d \cdot \tau} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_z} + \frac{3}{k \cdot \Theta \cdot r}} \cdot C_{AO}$$

або

$$\frac{1}{V_q} \cdot \frac{d \cdot G_A}{d \cdot \tau} = \frac{1}{\frac{1}{k \cdot \Theta} + \frac{r}{3 \cdot \beta_z}} \cdot C_{AO}$$

де V_q – об'єм частинок каталізатора;

k – константа швидкості реакції, віднесена до 1 м³ каталізатора;

$\Theta = \frac{\bar{C}_A}{C_{Ae}}$, $\bar{C}_A$ – середня концентрація компоненту A всередині пори; C_{Ae} – максимально можлива концентрація компоненту A у поверхні каталізатора; C_{AO} – початкова концентрація компоненту.

Каталітичні реактори можуть бути з нерухомим, рухомим і псевдозрідженим шаром каталізатора (рис. 10.1). Вони працюють за принципом ідеального витіснення або ідеального змішення. Для визначення розмірів реакторів проводять кінетичні розрахунки, а також розрахунок матеріальних і теплових балансів.

При очищенні газів реакції протікають головним чином в дифузійних областях. Для знаходження розмірів реактора визначають число одиниць перенесення і висоту, еквівалентну одиниці перенесення ($h_{БЕП}$):

$$H_p = h_{БЕП} \cdot N_0;$$

$$h_{БЕП} = \frac{G_z}{M_{cp} \cdot \beta_z \cdot a_{cp}};$$

$$\Delta p_{cp} = \frac{(P + p_A \cdot \gamma_A) - (P - p_{Ai} \cdot \gamma_A)}{\ln \frac{P + p_A \cdot \gamma_A}{P - p_{Ai} \cdot \gamma_A}}.$$

Число одиниць перенесення розраховують за рівнянням:

$$N_0 = \int_{P_A}^{P_{As}} \frac{p_{cp} \cdot d \cdot p_A}{(P + p_A \cdot \gamma_A) \cdot (p_A - p_{As})} = \int_{N_A}^{N_{As}} \frac{N_{cp} \cdot d \cdot N_A}{(1 + N_A \cdot \gamma_A) \cdot (N_A - N_{As})},$$

де H_p – висота реактора;

G_z – масова швидкість газу, кг/(м²·год);

M_{cp} – середня молекулярна маса компонентів газового потоку;

a – питома поверхня каталізатора, м²/м³;

p_{cp} – середній логарифмічний парціальний тиск компоненту A в плівці газу біля поверхні каталізатора;

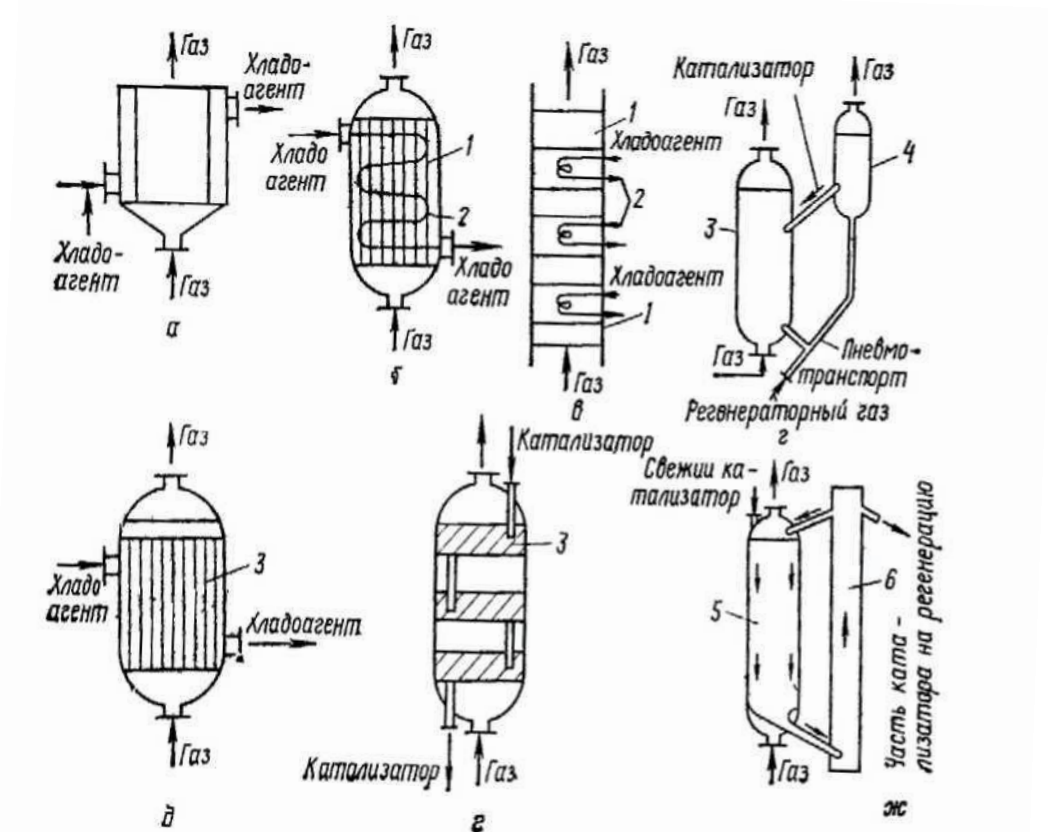


Рис. 10.1. Схеми каталітичних реакторів:

а – з нерухомим шаром каталізатора; б – з нерухомим шаром каталізатора і охолодженням; в – багатошаровий з охолодженням; г – з псевдозрідженим шаром; д – з псевдозрідженим шаром і з охолодженням; е – багатоступінчатий з псевдозрідженим шаром; ж – з рухомими шарами (1 – нерухомий шар; 2 – холодильник; 3 – зважений шар; 4 – регенератор; 5 – рухомий шар; 6 – елеватор)

p_A – парціальний тиск компоненту А, Па;

p_{As} – парціальний тиск компоненту на поверхні каталізатора, Па;

γ_A – зміна числа молів компоненту А в результаті реакції (на 1 моль вихідної речовини А);

$N_{cp} = p_{cp}/P$ – середнє логарифмічне значення концентрації реагенту А в плівці газу;

N_A і N_{As} – мольна частка компоненту А в газі і на поверхні каталізатора відповідно.

Для визначення числа одиниць перенесення графічною інтеграцією відкладають на осі ординат значення p_A , а на осі абсцис:

$$\frac{p_{cp}}{(P + p_A \cdot \gamma_A) \cdot (p_A - p_{As})}.$$

Гідрравлічний опір реактора розраховують по різних формулах залежно від його конструкції. Для реактора з нерухомим шаром каталізатора:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{a}{\varepsilon_0^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot w_\phi^2}{2} \cdot H_0,$$

де ξ – коефіцієнт опору, при $Re < 50$ величина $\xi = 220/Re$; при $Re > 50$ величина $\xi = 11,6/Re^{0,25}$;

w_ϕ – фіктивна швидкість газу, м/с;

H_0 – висота нерухомого шару каталізатора, м;

ε_0 – порізність нерухомого шару.

Для реактора із зваженим шаром частинок швидкість початку зважування знаходять за формулою:

$$Re_{36} = \frac{A \cdot r}{1400 + 5,22 \cdot A \cdot r^{0,5}};$$

$$w_0 = w_{36} \cdot \varepsilon.$$

Гідравлічний опір зваженого шару розраховується за формулою:

$$\Delta P = g \cdot \rho_T \cdot (1 - \varepsilon) \cdot H.$$

Значення H і ε визначають таким чином:

$$H = \frac{H_0 \cdot (1 - \varepsilon_0)}{1 - \varepsilon};$$

$$\varepsilon = \frac{18 \cdot Re + 0,36 \cdot Re^2}{A \cdot r},$$

де ε – середня порізність зваженого шару;

H – висота зваженого шару.

Для відведення (підведення) тепла із реакторів з нерухомим шаром використовують теплообмінники, розташовані поза шарами каталізатора, а в реакторах із зваженим шаром – теплообмінники, розташовані всередині шарів каталізатора. Поверхню теплообміну розраховують за рівнянням тепловіддачі.

Коефіцієнт тепловіддачі від зваженого шару до поверхні теплообміну a_{36} при оптимальній швидкості газу розраховують за формулою:

$$Nu = 0,86 \cdot A \cdot r^{0,2},$$

де $Nu = a_{36} \cdot d / \lambda_z$ – критерій Нусельта;

λ_z – коефіцієнт теплопровідності газу, Вт/(м·К).

Каталітичне окислення використовують для видалення діоксиду сірки з димових газів, а каталітичне відновлення для знешкодження газів від оксидів азоту. Окислення проводять на ванадієвому каталізаторі при 450...480°C. Після окислення гази направляють на абсорбцію. Каталітичне відновлення оксидів азоту проводять до елементного азоту у присутності газу-відновника. Як відновники використовують метан, коксовий і природний газ, оксид вуглецю, водень, аміак. Каталізаторами служать платинові метали, паладій, рутеній, платина, родій або сплави, що містять нікель, хром, мідь, цинк, ванадій, церій і ін. Ступінь очищення досягає 96%.

Використання кожного каталізатора має певні температурні обмеження. Перевищення температури призводить до його руйнування. Перегрівання каталізатора найчастіше відбувається через нестабільність вмісту окислюваних компонентів відхідних газів, концентрації яких за технологічний цикл зазвичай кілька разів змінюються від нуля до максимуму, що досягає іноді декількох десятків грам на кубометр викидів. Для запобігання перегріванню доводиться обладнувати установки знешкодження автоматикою регулювання подачі енергоносія (зазвичай газового палива) залежно від концентрації забруднювача. Система автоматики ґрунтується на особливостях конкретних технологічних процесів і розробляється індивідуально.

Конструктивно установки термokatалізу зазвичай складаються з топки із газопальниковими пристроями і реактора, в якому розміщуються каталітичні

насадки.

Проектування установки термокаталітичного знешкодження зводиться до підбору конструкцій і розмірів топкових і пальникових пристроїв, типу каталізатора і способу його розміщення в реакторі. Виконують також гідравлічні розрахунки повітроводів, газопроводів, димарів, підбирають вентилятори і димосмоки.

Кількість паливного газу визначають за температурою процесу термокаталітичного знешкодження, яку знаходять дослідним шляхом або за діючими аналогами. Розміри реактора залежать від кількості оброблюваних викидів і об'єму каталізаторної маси. Останній параметр може бути визначений лише експериментально або за відомостями про діючі аналоги, реально забезпечуючих необхідний ступінь очищення. Відомості подібного роду можна вважати надійними, якщо вони отримані фахівцем при безпосередньому ознайомленні з діючою установкою.

Подачу оброблюваних газів зазвичай задають у вигляді витрати, $\text{м}^3/\text{год}$, що доводиться на 1 м^3 каталізаторної маси. Таку характеристику називають швидкістю обробки і використовують для порівняння пропускної спроможності реакторів. У літературі наводиться інформація про установки знешкодження з швидкостями обробки $50000 \dots 1000000 \text{ год}^{-1}$ і вище. Із збільшенням прийнятого значення швидкості обробки зменшується ступінь конверсії початкових забруднювачів. Їх перетворення не дійдуть до кінцевої стадії з нешкідливими продуктами – CO_2 і H_2O , а зупиняться на якій-небудь з проміжних ступенів окислення з утворенням сполук, можливо більш небезпечних, ніж початкові.

10.2. Термічні методи знешкодження газоподібних сполук

Термічна обробка газоподібних сполук дозволяє проводити знешкодження промислових газових викидів, використовуючи термічні методи прямого і каталітичного спалювання. Метод прямого спалювання застосовують для знешкодження промислових газів, що містять органічні домішки, що легко окислюються, наприклад пари вуглеводнів. Продуктами згорання вуглеводнів є діоксид вуглецю і вода, а органічних сульфідів – діоксид сірки і вода.

Система, що містить токсичні речовини, може бути знешкоджена за допомогою термообробки, якщо реакції, що відбуваються в ній, приведуть до утворення менш токсичних компонентів.

Із усіх окислювальних процесів для термознешкодження придатні виключно реакції з киснем, оскільки за участю інших окислювачів принципово неможливо отримати нешкідливі продукти окислення. Тому далі під терміном “окислення” мається на увазі процес, окислювачем в якому служить кисень.

Газофазний процес термоокиснення здійснюють безпосередньою вогняною обробкою (спалюванням в полум'ї) газових викидів при температурах, що перевищують температуру займання горючих компонентів викидів.

Вогняною обробкою, як і термокаталітичним окисленням, принципово можливо знешкоджувати лише речовини, молекули яких не містять яких-небудь інших елементів, окрім водню H_2 вуглецю C і кисню O_2 . Шляхом спалювання можливе знешкодження перерахованих речовин в газоподібному, рідкому і твердому станах.

Забруднювачі, що містять які-небудь елементи, окрім Н, С і О – сірку S, фосфор Р, галогени, метали і ін., не можна подавати на термоокислювальну обробку, оскільки продукти згорання міститимуть високотоксичні сполуки. У реальних умовах і при спалюванні чисто органічних сполук не вдається забезпечити абсолютно повне окислення вихідних компонентів до практично нешкідливих вуглекислого газу CO_2 і пари води H_2O . У димових газах завжди присутні оксид вуглецю CO і інші продукти хімічного недопалювання (неповного окислення). Крім того, при підвищених температурах помітно прискорюється реакція окислення азоту, який поступає в зону горіння з паливом і повітрям. Деякі оксиди азоту шкідливо впливають на організм людини і навколишнє середовище.

Можливості термоокислювального методу знешкодження обмежуються також кількістю вихідних газів і вмістом в них горючих компонентів. Якщо концентрація горючих компонентів викидів не досягає нижньої межі займання (“бідні” палимим викиди), то їх вогняна обробка вимагає додаткової витрати палива на прогрівання викидів до температури самозаймання, яка для пари вуглеводнів і кисневих похідних вуглеводнів складає близько $500\ldots 750^\circ\text{C}$.

При виборі способів знешкодження орієнтовну кількість вихідних газів, “бідних” палимим, яка може бути піддана термоокислювальній обробці з прийнятною витратою палива, можна приймати не вище $1,5\ldots 2 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для великих джерел викидів з невисоким вмістом забруднювачів більш оптимальним рішенням є комбіноване двоступінчате очищення з попередньою концентрацією горючих компонентів до нижньої межі займання. Подальша вогняна обробка подібних викидів стає економічно прийнятною. Вплив горючих компонентів на параметри горіння стає помітним при концентраціях більше $50\ldots 100 \text{ мг}/\text{м}^3$.

10.2.1. Установки термознешкодження газових викидів

Гази спалюють на установках з відкритим факелом або в печах різних конструкцій. Пряме спалювання здійснюють при температурі $700\ldots 800^\circ\text{C}$ з використанням газоподібного або рідкого палива. Для спалювання необхідний надлишок кисню на $10\ldots 15\%$ більший стехіометричної кількості. Якщо теплоти згорання вуглеводнів досить, щоб теплота реакції перевищувала $1,9 \text{ Мдж}/\text{м}^3$, гази також спалюють у факелі. Щоб полум’я факела було таким, що не коптить, додають воду у вигляді пари. В цьому випадку відбувається реакція водяної пари з вуглеводнями, що супроводжується утворенням водню і оксиду вуглецю. Кількість пари залежно від концентрації вуглеводнів коливається від $0,05$ до $0,33 \text{ кг}/\text{кг}$.

Якщо концентрація горючих газів низька і тепла, що виділяється, недостатньо для реакції згорання, то гази заздалегідь підігрівають. На рис. 10.2, 10.3 і 10.4 показані різні схеми факельних установок. Установка, представлена на рис. 10.2, працює при надлишковому тиску $0,15 \text{ МПа}$.

На рис. 10.3 показана установка для факельного спалювання газів, змонтована на технологічному апараті, на рис. 10.4 – установка для спалювання газів, що містять ацетилен. Горіння таких газів супроводжується утворенням значної кількості технічного вуглецю, тому передбачена подача пари в газовий потік. Для підпалу основного пальника у всіх установках передбачений черговий пальник, що працює на природному газі.

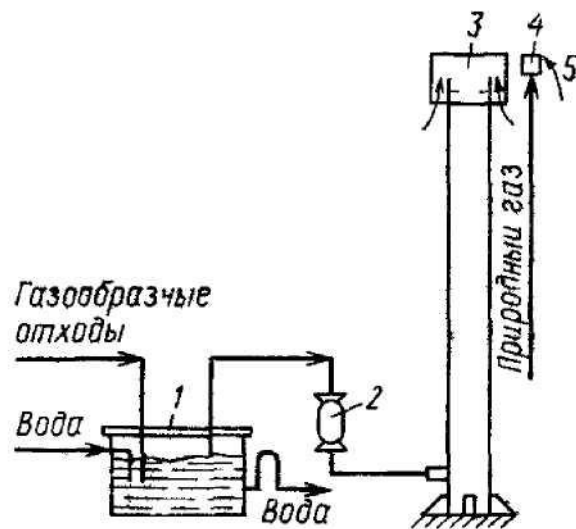


Рис. 10.2. Установка для факельного сжигания газоподобных отходов
 1 – гидрозасув; 2 – вогнезагороджувач; 3 – основний пальник; 4 – черговий пальник;
 5 – система запалення чергового пальника

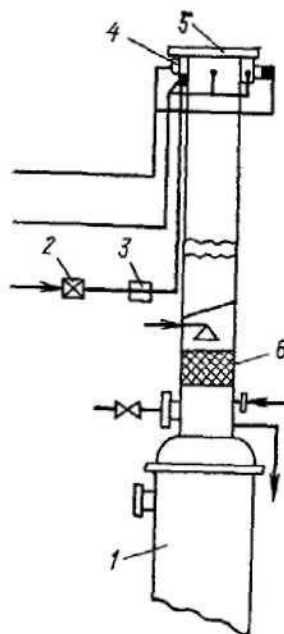


Рис. 10.3. Установка для факельного сжигания газоподобных отходов змонтована на реакторі
 1 – реактор; 2 – ежекційний змішувач; 3 – електрозапал; 4 – черговий пальник; 5 – основний пальник; 6 – насадка-вогнезагороджувач

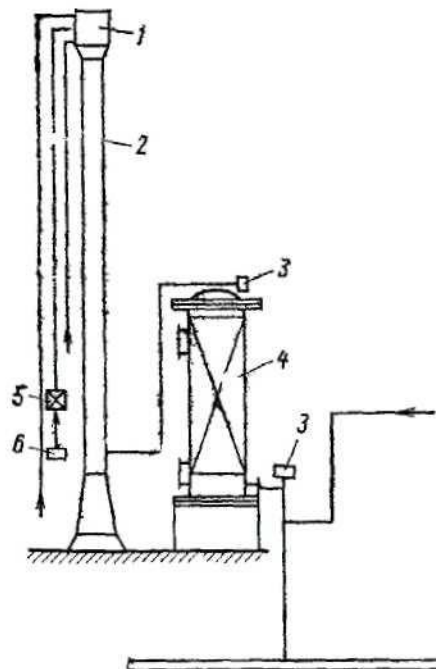


Рис. 10.4. Установка для факельного спалювання газів, що містять ацетилен
1 – факельний пальник; 2 – труба; 3 – розривні мембрани; 4 – вогнезагороджувач; 5 – інжекційний змішувач з електрозапалом; 6 – система запалення чергового пальника

Термоокислювальне знешкодження концентрованих газів проводиться в установках, які зазвичай складаються з топкових і пальникових пристроїв з димарями для відведення продуктів згорання і теплоутилізаторами.

Схеми термічних нейтралізаторів показані на рис. 10.5 і 10.6. Конструкція нейтралізатора повинна забезпечувати нейтралізацію токсичного продукту. Для цього час перебування його в нейтралізаторі складає 0,1...1,0 с. Температура спалювання на 100...150°C перевищує температуру самозапалення, наведені в додатку .

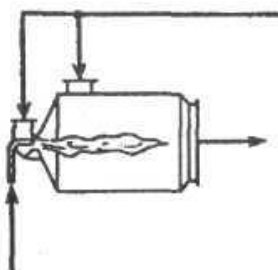


Рис. 10.5. Схема термічного нейтралізатора промислових газових відходів без теплообмінника

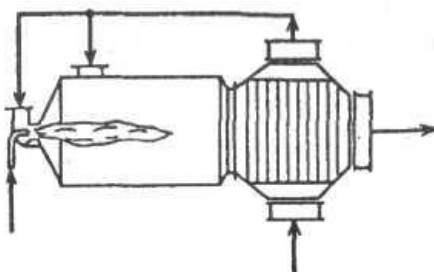


Рис. 10.6. Схема термічного нейтралізатора промислових газових відходів з теплообмінником

Конструкції топкових пристроїв для печей термознешкодження можна розділити на камерні, циклонні, шахтні і барабанні. Найбільш поширені вертикальні і горизонтальні камерні (рис.10.7, *а*), а також циклонні горизонтальні (рис.10.7, *б*) конструкції.

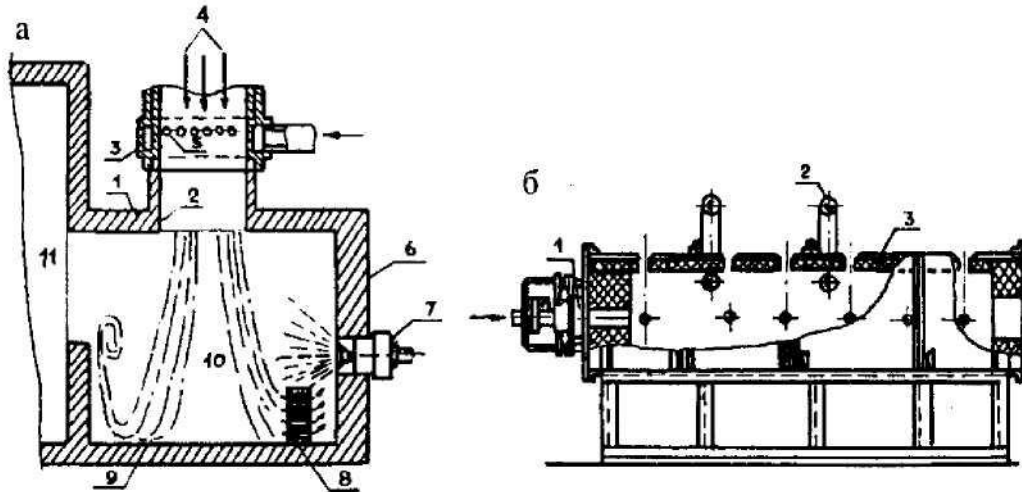


Рис. 10.7. Конструкції топкових пристроїв

а – камерна піч для спалювання газоподібних відходів (1 – корпус печі; 2 – отвір; 3 – колектор; 4 – газоподібні відходи; 5 – розподільні патрубки; 6 – фронтowa стіна; 7 – пальник; 8 – перфорована стінка; 9 – під; 10 – камера; 11 – камера для утилізації тепла); *б* – циклонна горизонтальна піч (1 – пальник; 2 – циліндрична камера; 3 – патрубки для відхідного газу)

У циклонних печах організовується обертально-поступальний рух продуктів горіння, що забезпечує більший час перебування оброблюваних газів, ніж в камерних печах таких же габаритів. Останні зазвичай конструюють одно- або двоходовими по димових газах. Вони можуть бути прямокутного або круглого перерізу. Вертикальні прямокутні конструкції мають гірше заповнення об'єму топки димовими газами в порівнянні з горизонтальними топками круглого перерізу. У камерних топках можливий пристрій додаткових зведень, що підвищують температуру в реакційній зоні, що неможливо виконати в циклонних печах. Зрештою конструкція і габарити топкового пристрою виконуються такими, щоб забезпечити необхідний час перебування вихідних газів в зоні високих температур.

Тип пальникового пристрою для установок термознешкодження і схему підведення відхідних газів вибирають залежно від їх складу. Газові викиди з високим вмістом кисню, які можуть бути використані в якості як повітря для дуття, найвигідніше подавати в повітряні тракти газопальникові пристрої дуття. Багаті палим газів викиди з низьким вмістом (або відсутністю) кисню можна подавати безпосередньо в газові і повітряні тракти пальників дуття. Пальники інжекційного типу для цих цілей практично непридатні через нестабільність складу викидів. В той же час інжекційні пальники, що працюють на паливному газі стабільного складу, знаходять застосування як пілотні (що підтримують горіння) пристрої. Висока

температура в зоні горіння таких пальників забезпечує термоокиснення забруднювача при коливаннях складу оброблюваних газів. Крім того, вони не вимагають витрат електроенергії на подачу повітря для горіння.

Одна з конструкцій факельного пальника з паровими дюзами показана на рис. 10.8, пальник для спалювання галогеновмісних домішок представлений на рис. 10.9.

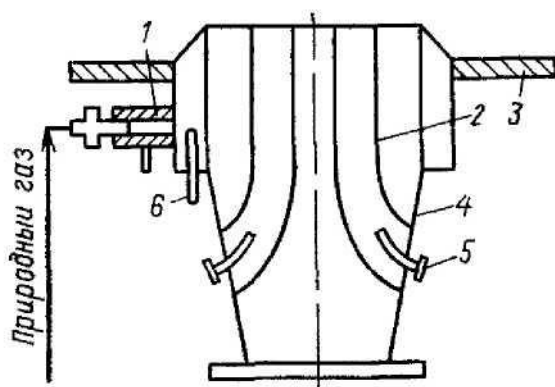


Рис. 10.8. Факельний пальник з паровими дюзами

1 – черговий пальник; 2 – повітряна труба; 3 – захисний козирок; 4 – корпус факельного пальника; 5 – парова дюза; 6 – кишень для термодпар

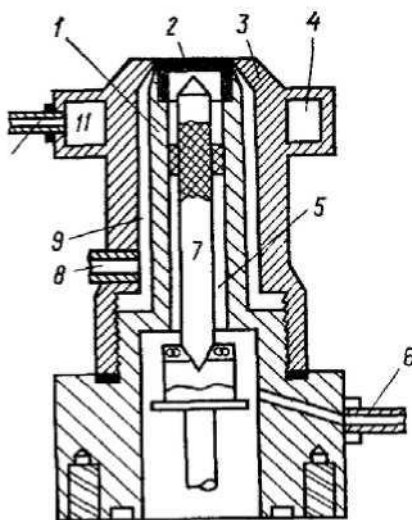


Рис. 10.9. Пальник для спалювання галогеновмісних газів в атмосфері інертного газу

1 – внутрішній корпус пальника; 2 – отвір для виходу газоподібних відходів; 3 – зовнішній корпус пальника; 4 – отвір для виходу інертного газу; 5 – канал для суміші інертного газу і газових відходів; 6 – введення інертного газу; 7 – голка; 8 – ввід природного газу; 9 – кільцевий простір для природного газу; 10 – штуцер для подачі інертного газу; 11 – кільцевий простір для інертного газу

Із дифузійних пальників заслуговує уваги достатньо проста конструкція, що є перфорованою трубою, встановленою в потоці відхідних газів так, що газові факели, що виходять з отворів, розвиваються в її аеродинамічному сліді, за рахунок чого забезпечується стійкість газового факела при високих значеннях коефіцієнтів надлишку повітря. В результаті через пальниковий пристрій вдається пропустити велику кількість відхідних газів при незначній витраті паливного газу. Проте при

великих надлишках повітря середня температура газів стає нижчою за температуру samozаймання пари органічних сполук, внаслідок чого термоокисненню будуть піддані лише частинки, що безпосередньо стикаються з факелом. У той же час такий пристрій може бути ефективно використаний і при вищих надлишках повітря, якщо на знешкодження надходять гарячі газові викиди.

10.2.2. Принципи розрахунку установок термознешкодження

Повнота термоокислення органічних забруднювачів залежить від температури процесу, часу перебування частинок забруднювача і кисню в зоні високих температур, теплонапруги топкового об'єму, фізико-хімічних властивостей забруднювачів, параметрів стану і складу відхідних газів, а також безлічі інших чинників.

Пропонована методика розрахунку дозволяє отримати орієнтовні значення параметрів процесу.

Розрахунок складається з наступних стадій: визначення складу продуктів згорання, коефіцієнта надлишку повітря і температури горіння, часу перебування і розмірів топкового пристрою; підбір типорозмірів пальникових пристроїв; розрахунок газопроводів, повітропроводів, димарів, підбір газоустаткування і пристроїв тягодуття.

Початкові дані для розрахунку – витрата відхідних газів W_z (м³/с) і їх склад, виражений об'ємними долями компонентів r_i .

Витрата паливного газу W_n (м³/с) визначається із співвідношення:

$$W_n = \frac{W_z \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^N r_i\right)}{\alpha_B \cdot \nu_B},$$

де N – кількість забруднювачів;

α_B – коефіцієнт надлишку повітря по відношенню до палива;

ν_B – теоретично необхідна кількість повітря, розрахована за складом палива, м³/м³.

При обробці газів з низьким вмістом кисню величину коефіцієнта надлишку повітря за паливом приймають в межах $\alpha_B=1,05\dots1,2$. Якщо відхідні газы використовуються як повітря для горіння, то для зменшення споживання палива слід приймати по можливості більший коефіцієнт надлишку повітря (орієнтовно $\alpha_B \approx 3$).

Об'єм топки (м³) розраховують за виразом:

$$V_T = \frac{\sum_{i=1}^N W_i \cdot Q_i}{q_V},$$

а її теплове навантаження (кВт) – як

$$V_T \cdot q_V = \sum_{i=1}^N W_i \cdot Q_i,$$

де W_i , Q_i – відповідно витрата, м³/с, і теплота згорання, кДж/м³, паливного газу або (і) відхідних газів, що містять горючі речовини;

q_V – допустима теплова напруга топкового об'єму, кВт/м³;

N – кількість видів горючих газів.

При вмісті горючих токсичних забруднювачів у відхідних газах менше 50...100 мг/м³ величину Q можна розраховувати за звичайними співвідношеннями для паливного газу.

Значення q_V для прямоточних конструкцій топок рекомендується приймати не більше 200 кВт/м³. Для циклонних топок ця величина може бути збільшена в 4...5 разів.

Необхідний час перебування τ_{np} (с) органічних токсичних сполук в зоні реакції при температурі горіння $t_{гор}=700...1000^\circ\text{C}$ орієнтовно визначається за емпіричною формулою:

$$\tau_{np} = 25 \cdot \left(1 - \frac{t_{гор}}{1060} \right).$$

За відсутності дослідних даних про температуру горіння її можна оцінити за співвідношенням:

$$t_{гор} = \eta \cdot t_{кал},$$

де η – пірометричний коефіцієнт, значення якого приймають для неекраниваних неізольованих топок в межах 0,75...0,85, для екраниваних – в межах 0,5...0,8, для неекраниваних ізольованих – в межах 0,8...0,09;

$t_{кал}$ – калориметрична температура горіння.

При вмісті горючих забруднювачів більше 100...150 мг/м³ необхідно враховувати їх вплив на процес горіння.

По знайденій величині τ_{np} проводять перевірку достатності прийнятого раніше об'єму топки:

$$V_T = \frac{\tau_{np} \cdot W_{д.г} \cdot (273 + t_{гор})}{273 \cdot K_T},$$

де K_T – коефіцієнт заповнення топки продуктами згорання, значення якого можна приймати від 0,7 для вертикальних прямокутних до 0,95 для циклонних топок;

$W_{д.г}$ – витрата димових газів, м³/с.

При вмісті забруднювачів менше 200 мг/м³ величину $W_{д.г}$ підраховують за виразом:

$$W_{д.г} = W_T \cdot (V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}),$$

де $V_{CO_2}, V_{H_2O}, V_{N_2}, V_{O_2}$ – об'єми відповідних компонентів продуктів згорання, віднесені до 1 м³ паливного газу, що визначаються за його складом.

При значних концентраціях горючих забруднювачів витрату димових газів розраховують за виразом:

$$W_{д.г} = \frac{W_T \cdot (V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2})}{R_T},$$

де $V_{CO_2}, V_{H_2O}, V_{N_2}, V_{O_2}$ – об'єми відповідних компонентів продуктів згорання, віднесені до 1 м³ горючої суміші палива і забруднювачів;

R_T – доля палива в горючій суміші.

Знаходять еквівалентний діаметр D_e (м) і довжину l (м) або висоту h (м) топкового пристрою:

$$D_e = 0,8 \cdot V_T^{1/3};$$

$$l = (2,0...2,3) \cdot D_e;$$

$$h = (1,7...2,0) \cdot D_e .$$

За витратою газового палива підбирають розмір пальникового пристрою, необхідне газоустаткування і розраховують діаметри газопроводів, а по витраті димових газів знаходять розміри димоходів, димаря і при необхідності – димосмоку.

Розділ 11

Очистка газових викидів автомобільного транспорту

11.1. Характеристика викидів двигунів внутрішнього згорання

Забруднення навколишнього середовища викидами двигунів внутрішнього згорання представляє останніми роками все більшу небезпеку через зростання загрози здоров'ю людини і навколишньому середовищу.

У загальному балансі забруднення атмосфери антропогенними джерелами транспортні засоби є найбільш істотним джерелом, хоча основну частку цих забруднень складають відносно неотруйні оксиди вуглецю.

Сучасний спосіб життя і розвинене виробництво тісно пов'язані з автомобільним транспортом, який набув широкого поширення, маючи ряд переваг: 1) відносно високу швидкість руху по вдосконалених дорогах; 2) хороша прохідність і маневреність; 3) можливість економічного перевезення дрібних партій вантажів; 4) менш високі капітальні вкладення в будівництво автодоріг порівняно із залізничним транспортом. На початку ХХ ст. на нашій планеті налічувалося 6 тис. автомобілів. До 1998 р. число транспортних засобів з бензиновим двигуном у всьому світі перевищило 1,5 млрд. Протяжність автомобільних доріг з асфальтовим покриттям тільки в Європі і Північній Америці досягла майже 10 млн. км. По ним щорічно перевозиться 16 млрд. т вантажів.

Разом з тим автомобілі є одним з основних джерел забруднення навколишнього середовища, перш за все повітряного басейну, такими токсикантами, як монооксид вуглецю, оксиди азоту, свинець, вуглеводні і ін. Загалом у викидах двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) міститься понад 100 шкідливих речовин, які умовно поділяють на шість груп:

- CO_2 , водяна пара, водень, кисень, азот (нетоксичні);
- оксид карбону;
- оксиди нітрогену;
- вуглеводні (в тому числі бенз(а)пірен);
- альдегіди;
- кіптява.

Розвиток і збільшення автомобільного парку породжує зростання забруднення атмосфери. Приблизно 60% забруднення атмосфери припадає на автотранспорт. На інші види транспорту доводиться невелика частина забруднень атмосфери. Так, в 1990 р. викиди автотранспорту по основних забруднювачах в світі склали, млн. т: вуглеводні – 39, монооксиди вуглецю – 231, діоксид вуглецю – 3969, оксиди азоту – 32. До 70% токсичних з'єднань свинцю, що містяться в етилованому бензині, також потрапляють в атмосферу. Токсичними викидами автомобілів, окрім вказаних вище вихлопних газів, є також гази картерів, пари палива з карбюратора і паливного бака.

Автотранспорт істотно забруднює також воду (нафта, мастила, розчинники) і ґрунт (нафта, нафтопродукти, кольорові метали і гума як наслідок стирання деталей автомашин і покришок). На місці масляних плям протягом 20 років нічого не росте, смуга шириною 50...100 м по обидві сторони від доріг є зоною деградації ґрунтово-

рослинного покриву з надлишком важких металів (10...20 ГДК) і дефіцитом біогенних елементів.

У забрудненні атмосферного повітря великих міст світу частка автомобільного транспорту варіює, %: 88...97 CO, 31...33 NO_x, 63...95 вуглеводнів. Особливо високий вміст оксиду вуглецю в повітрі відмічений на вуличних перехрестях, де двигуни автомобілів працюють на збагачених сумішах перед світлофором. Вихлопні гази і сильні коливання ґрунту від автомобілів прискорюють процес старіння будівель, призводять до деградації придорожньої рослинності.

У районах з вузькими вулицями і високими будинками велика концентрація оксиду вуглецю розсівається поволі і викликає хронічні отруєння людей, що тривалий час знаходяться в цих районах, особливо на перехрестях (регулювальників вуличного руху, вуличних торговців і так далі).

Основні екологічні занепокоєння пов'язані з високою токсичністю вихлопних газів і незадовільними шумовими характеристиками автомобілів. Пробіг в 1000 км для кожного легкового автомобіля супроводжується використанням значної кількості кисню і викидом з вихлопної труби до 40 кг речовин, що забруднюють атмосферу.

Кількісний склад газоподібних викидів ДВЗ залежить передусім від типу двигуна, режиму його роботи та справності. Зношування частин двигунів, як карбюраторних, ежекторних, так і дизельних, призводить до збільшення витрат палива. Це, в свою чергу, призводить до збільшення кількості шкідливих речовин у викидах. Так, при збільшенні витрат пального на 10%, кількість шкідливих речовин у викидах збільшується на 15...50%.

Речовини, які містяться у відпрацьованих газах автомобілів – десятки компонентів, значна частина з яких канцерогенні, що викликають кисневе голодування, порушення функцій центральної нервової системи, роздратування слизових оболонок очей, носа. Основними забруднювачами транспортних засобів є вуглеводні, оксид вуглецю і оксиди азоту.

Вуглеводні – це широкий клас абсолютно довільних сумішей вуглеводневих сумішей. Вони походять з бензину, дизельного палива і продуктів їх згорання. До складу цих палив входять сотні вуглеводневих сполук. Для спрощення зазвичай з вуглеводнів виділяють якусь певну сполуку і оперують надалі з нею, припускаючи, що останні еквівалентні їй. В якості такої сполуки вибирають зазвичай метан (CH₄), пропан (C₃H₈) або гексан (C₆H₁₄).

В інженерній термінології для невідомої суміші оксидів азоту прийнято позначення NO_x. Як правило, у викидах оксидів азоту домінує оксид азоту (NO) з невеликою домішкою (<10%) діоксиду азоту (NO₂). У атмосферних умовах NO перетворюється на NO₂.

Викиди двигунів внутрішнього згорання діляться на викиди від карбюраторних і дизельних двигунів. Такий розподіл пов'язаний з тим, що карбюраторні двигуни (КД) працюють з однорідними паливноповітряними сумішами, тоді як дизельні двигуни (ДД) – з гетерогенними сумішами.

Викиди забруднень від двигунів внутрішнього згорання карбюраторного типу включають вуглеводні, оксиди вуглецю, оксиди азоту і нерегулярні викиди. Забруднення виникають внаслідок реакцій і в процесі горіння в об'ємі і на поверхнях. Прорив газів через поршневі кільця і вихлоп з циліндрів є менш

інтенсивним джерелом викидів забруднень.

У 1980 р. 4% легкових і вантажних автомобілів, що випускаються в світі, було оснащено дизелями, а до кінця 80-х років цей показник зріс до 25%. Основні викиди забруднень дизельних двигунів ті ж самі, що і карбюраторних двигунів (вуглеводні, оксид вуглецю, оксиди азоту, нерегулярні викиди), але до них додаються частинки вуглецю (аерозоль сажі).

Вміст шкідливих речовин у викидах автомобілів коливається в широких межах і залежить від багатьох чинників, наприклад, при швидкості 70 км/год у вихлопі автомобіля міститься 0,2...0,3% CO, при швидкості більше 100 км/год і при роботі двигуна на холостому ході вміст цього небезпечного газу досягає 12%.

Легковий автомобіль викидає оксиду вуглецю CO до 3 м³/год, вантажний, – до 6 м³/год (3...6 кг/год).

Про склад вихлопних газів автомобілів з різними типами двигунів можна судити з даних, приведених в табл. 11.1.

Таблиця 11.1

Склад вихлопних газів автомобілів

Компоненти	Вміст, % (об.)	
	карбюраторний двигун	дизельний двигун
N ₂	74...77	76...78
O ₂	0,3...8,0	2...18
H ₂ O (пара)	3,0...5,5	0,5...4,0
CO ₂	5,0...12,0	1,0...10,0
CO	5,0...10,0	0,01...0,50
Оксиди азоту	0...0,8	2·10 ⁻³ ...0,5
Вуглеводні	0,2...3,0	10 ⁻³ ...0,5
Альдегіди	0...0,2	1·10 ⁻³ ...9·10 ⁻³
Сажа	0...0,4 г/м ³	0,01...1,1 г/м ³
Бенз(а)пірен	(10...20)·10 ⁻⁶ г/м ³	до 1·10 ⁻⁵ г/м ³

Викиди оксиду вуглецю і вуглеводнів у карбюраторних двигунів істотно вищі, ніж у дизельних двигунів.

11.2. Зниження викидів двигунів внутрішнього згорання

Підвищення екологічних показників автомобіля можливе за рахунок проведення комплексу заходів щодо вдосконалення його конструкції і режиму експлуатації. До поліпшення екологічних показників автомобіля призводять: підвищення його економічності; заміна бензинових ДВЗ на дизельні; переведення ДВЗ на використання альтернативних видів палива (стислий або зріджений газ, етанол, метанол, водень і ін.); застосування нейтралізаторів відпрацьованих газів ДВЗ; вдосконалення режиму роботи ДВЗ і технічного обслуговування автомобіля.

Відомі і застосовуються ряд методів зниження токсичності вихлопних газів. Серед них робота автомобіля в умовах, коли двигун виділяє найменшу кількість токсичних речовин (зменшення гальмування, рівномірний рух з певною швидкістю і т.д.); застосування спеціальних присадок до палива, що збільшують повноту його згорання і зменшують викид CO (спирти, інші сполуки); полуменеве допалювання деяких шкідливих компонентів.

У карбюраторних двигунах співвідношення між повітрям і паливом впливає на вміст вуглеводнів і оксиду вуглецю у вихлопі. Так, наприклад, викиди збільшуються при збільшенні збагачення суміші. Вміст СО збільшується через неповне згорання, викликане нестачею кисню в суміші. Збільшення вмісту вуглеводнів викликане в першу чергу збільшенням адсорбції палива і посилення механізму неповного згорання палива. Бідні суміші створюють нижчі концентрації C_nH_m і СО у викиді в результаті їх повнішого згорання.

У дизельних двигунах потужність змінюється при зміні кількості вприскуваного палива. В результаті змінюється розподіл струменя палива, кількість палива, що вдаряється об стінку, тиск в циліндрі, температура, а також тривалість вприскування.

Фахівці вважають, що для помітного зниження шкідливих викидів необхідно скоротити використання бензину з 8 літрів на 100 км пробігу – до 2...3 л. Це вимагає вдосконалення будови двигуна і якості пального; переходу на неетилований бензин; застосування каталітичного допалювання для зменшення викиду СО; впровадження електронної системи управління процесів горіння палива; і інші заходи, зокрема використання глушників шуму в системі вихлопу.

Підвищення паливної економічності автомобіля досягається головним чином за рахунок вдосконалення процесу згорання в ДВЗ: поширене спалювання палива; форкамерно-факельне спалювання; застосування підігріву і випаровування палива у впускному тракті; використання електронного запалення. Додатковими резервами підвищення економічності автомобіля є:

- зниження маси автомобіля за рахунок удосконалення його конструкції і застосування неметалічних і високоміцних матеріалів;
- покращення аеродинамічних показників кузова (останні моделі легкових автомобілів володіють, як правило, на 30...40% меншим коефіцієнтом лобового опору);
- зниження опору повітряних фільтрів і глушників, відключення допоміжних агрегатів, наприклад вентилятора і т.п.;
- зниження маси палива (неповне заповнення баків), що перевозиться, і маси інструментів.

Сучасні моделі легкових автомобілів істотно відрізняються паливною економічністю від попередніх моделей.

Перспективні марки легкових автомобілів володітимуть витратою бензину 3,5 л/100 км і менше. Підвищення економічності автобусів і вантажних автомобілів досягається перш за все застосуванням дизельних ДВЗ. Вони володіють екологічними перевагами в порівнянні з бензиновими ДВЗ, оскільки мають меншу на 25...30% питому витрату палива; крім того, склад відпрацьованих газів у дизельного ДВЗ менш токсичний (див. табл. 11.1).

Екологічними перевагами в порівнянні з бензиновими ДВЗ володіють двигуни, що працюють на альтернативних видах палива. Загальне уявлення про зниження токсичності ДВЗ при переході на альтернативне паливо можна отримати з даних, приведених в табл. 11.2.

Багато учених бачать часткове вирішення екологічної проблеми в переведенні автомобілів на газоподібне пальне. Так, вміст окису вуглецю у вихлопах газомобілів менший на 25...40%; окиси азоту на 25...30%; сажі на 40...50%. При використанні в

автомобільних двигунах зрідженого або стислого газу вихлопні гази майже не містять оксиду вуглецю. Вирішенням проблеми стало б широке використання електромобіля. Електромобілі, що випускаються, мають обмежений радіус дії внаслідок обмеженої ємності і великої маси батарей. Зараз ведуться широкі дослідження в цій області. Деякі позитивні результати вже досягнуті. Зниження токсичності викидів може бути досягнуте зменшенням вмісту сполук свинцю в бензині без погіршення його енергетичних якостей.

Таблиця 11.2

Токсичність викидів ДВЗ, що працюють на різних видах пального

Паливо	Викиди, %	
	CO	NO _x
Бензин	100	100
Природний газ	60	74
Метанол	50	55

Переведення на газове пальне не передбачає значних змін в конструкції ДВЗ, проте стримується відсутністю станцій заправки і необхідної кількості автомобілів, переобладнаних для роботи на газу. Крім того, автомобіль, переобладнаний для роботи на газовому пальному, втрачає вантажопідйомність через наявність балонів і запас ходу приблизно в 2 рази (200 км проти 400...500 км у бензинового автомобіля). Ці недоліки частково усунені при переведенні автомобіля на зріджений природний газ.

Використання метанолу і етанолу вимагає змін конструкції ДВЗ, тому, що спирти більш хімічно активні до гум, полімерів, мідних сплавів. У конструкцію ДВЗ необхідно вводити додатковий підігрівач для запуску двигуна в холодний період року (при $t < -25^{\circ}\text{C}$); необхідна виконати перерегулювання карбюратора, оскільки змінюється стехіометричне відношення витрати повітря до витрати палива. У бензинових ДВЗ воно рівне 14,7; у двигунів на метанолі – 6,45, а на етанолі – 9. За кордоном (Бразилія) застосовують суміші бензину і етанолу в пропорції 12:10, що дозволяє використовувати бензинові ДВЗ з незначними змінами їх конструкції, дещо підвищуючи при цьому екологічні показники двигуна.

Не дивлячись на те, що викиди токсичних речовин (C_nH_m і CO) з картера і паливної системи двигуна принаймні на порядок нижчі за викиди вихлопних газів, на сьогоднішній день розробляються методи спалювання газів картерів ДВЗ. Відома замкнута схема нейтралізації газів картерів з подачею їх у впускний трубопровід двигуна з подальшим допалюванням. Замкнута система вентиляції картера з поверненням газів картерів до карбюратора зменшує виділення в атмосферу вуглеводнів на 10...30%, оксидів азоту на 5...25%, але при цьому збільшується викид оксиду вуглецю на 10...35%. При поверненні газів картерів після карбюратора знижується викид C_nH_m на 10...40%, CO на 10...25%, але зростає викид NO_x на 10...40%.

Для запобігання викидам пари бензину з паливної системи, основна частина яких надходить в атмосферу, коли двигун не працює, на автомобілях встановлюють систему знешкодження випаровувань пального з карбюратора і паливного бака, що складається з трьох основних вузлів (рис. 11.1): герметичного паливного бака 1 із спеціальною ємністю 2 для компенсації теплового розширення пального; кришки 3 паливно-заправна горловина бака з двостороннім запобіжним клапаном для

запобігання надмірному тиску або розрідженню в баку; адсорбера 4 для поглинання пари пального при вимкненому двигуні із системою повернення пари у впускний тракт двигуна під час його роботи. Як адсорбент використовують активоване вугілля.

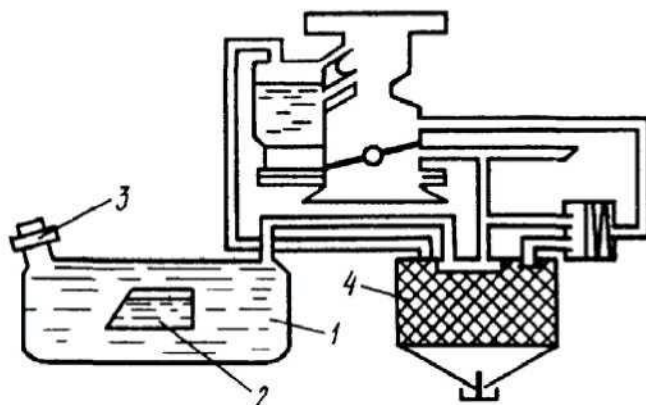


Рис. 11.1. Схема вловлювання пари пального бензинового ДВЗ

Дотримання регламенту технічного обслуговування і контроль складу відпрацьованих газів ДВЗ дозволяє значно скоротити токсичні викиди в атмосферу. Відомо, що при 160 тис. км пробігу і за відсутності контролю викиди CO зростають в 3,3 рази, а C_nH_m – в 2,5 рази.

11.3. Нейтралізація вихлопів двигунів внутрішнього згорання

Поліпшення екологічних характеристик автомобілів можливе за рахунок комплексу заходів щодо вдосконалення їх конструкцій і режимів експлуатації. До них відносяться підвищення економічності роботи двигунів, заміна їх бензинових версій на дизельні, використання альтернативних видів пального (стислий або зріджений газ, етанол, метанол, водень і ін.), використання нейтралізаторів відпрацьованих газів, оптимізація режиму роботи двигунів і технічного обслуговування автомобілів.

Значне зниження токсичності ДВЗ досягається при використанні нейтралізаторів відпрацьованих газів (ВГ). Відомі рідинні, каталітичні, термічні і комбіновані нейтралізатори. Найбільш ефективними з них є каталітичні конструкції. Оснащення ними автомобілів почалося в 1975 р. в США і в 1986 р. – в Європі. З тих пір забруднення атмосфери вихлопами різко знизилося – відповідно на 98,96 і 90% по вуглеводнях, CO і NO_x .

Нейтралізатор – це додатковий пристрій, який вводиться у випускную систему двигуна для зниження токсичності ВГ. Відомі рідинні, каталітичні, термічні і комбіновані нейтралізатори.

Принцип дії рідинних нейтралізаторів заснований на розчиненні або хімічній взаємодії токсичних компонентів ВГ при пропусканні їх через рідину певного складу: вода, водний розчин сульфату натрію, водний розчин двовуглекислої соди.

На рис. 11.2 представлена схема рідинного нейтралізатора, який використовують з двотактним дизельним двигуном. Відпрацьовані гази надходять в нейтралізатор по

трубі 1 і через колектор 2 потрапляють в бак 3, де вступають в реакцію з робочою рідиною. Очищені гази проходять через фільтр 4, сепаратор 5 і викидаються в атмосферу. В міру випаровування рідину доливають в робочий бак з додаткового бака 6.

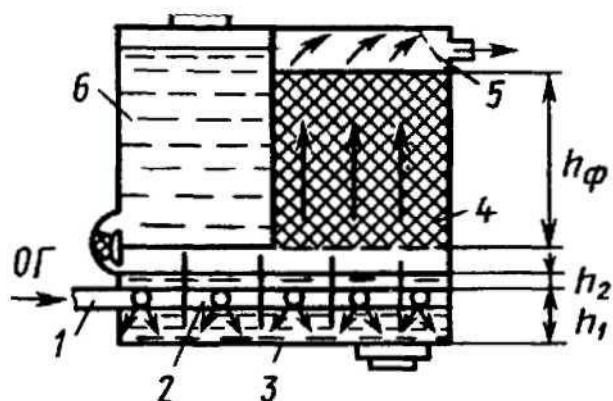


Рис. 11.2. Схема рідинного нейтралізатора

Пропускання відпрацьованих газів дизелів через воду призводить до зменшення запаху, альдегіди поглинаються з ефективністю 50%, а ефективність очищення від сажі досягає 60...80%. При цьому дещо зменшується вміст бенз(а)пірену у відпрацьованих газах дизелів. Температура газів після рідинного очищення складає 40...80°C, приблизно до цієї ж температури нагрівається і робоча рідина. При зниженні температури процес очищення йде інтенсивніше.

Рідинні нейтралізатори не вимагають часу для виходу на робочий режим після пуску холодного двигуна. Недоліки рідинних нейтралізаторів: велика маса і габарити; необхідність частої зміни робочого розчину; неефективність по відношенню до СО; мала ефективність (0,3) по відношенню до NO_x інтенсивне випаровування рідини. Проте використання рідинних нейтралізаторів в комбінованих системах очищення може бути раціональним, особливо для установок, відпрацьовані гази яких повинні мати низьку температуру під час викиду в атмосферу.

При розрахунку рідинного нейтралізатора визначають його основні розміри і необхідну кількість розчину для роботи протягом певного часу. Середні значення концентрацій шкідливих компонентів відпрацьованих газів до і після рідинного нейтралізатора приведені в табл. 11.3.

Таблиця 11.3

Ступінь очистки шкідливих компонентів відпрацьованих газів

Речовина	Концентрація, об'ємні долі, %		Ступінь очистки, %
	до нейтралізації	після нейтралізації	
СО	0,06	0,06	0
NO _x	0,002	0,001	50
Альдегіди	0,0144	0,003	98
SO ₂	0,008	0	100

Найбільш ефективним і перспективним засобом зменшення шкідливості вихлопу автомобілів є каталітична нейтралізація. Допалювання незгорілих компонентів вихлопів здійснюється на каталізаторах. Каталітичні реактори

встановлюються у вихлопній системі і, залежно від конструкції, використовується для видалення не тільки CO і C_nH_m , але і NO_x . Сучасний допалювач забезпечує очищення повітря від оксиду вуглецю на 98%. У допалювачі повинна підтримуватися температура 200°C . Це досягається за рахунок теплоти, що виділяється при окисленні допалюваної домішки (при окисленні CO в CO_2 відбувається виділення теплоти).

До каталітичних нейтралізаторів відпрацьованих газів ставляться багато вимог, що зумовлено значною об'ємною швидкістю газів, високою їх температурою, а також зміною хімічного складу газів у процесі роботи автомобіля, який включає холосту роботу двигуна, середній хід, повну швидкість, прискорення та сповільнення. Такі каталізатори повинні володіти універсальністю дії (поліфункціональністю), бути стійкими до дії каталітичних отрут і працювати в широкому інтервалі температур, починаючи з порівняно низьких ($100\ldots150^\circ\text{C}$) до вищих (650°C і вище), при високих об'ємних швидкостях відхідних газів (до $1\cdot10^5$ $\text{дм}^3/\text{год}$).

Каталітична нейтралізація відпрацьованих газів ДВЗ на поверхні твердого каталізатора відбувається за рахунок хімічних перетворень (реакції окислення або відновлення), в результаті яких утворюються нешкідливі або менш шкідливі для навколишнього середовища і здоров'я людини сполуки.

Для очищення відпрацьованих газів ДВЗ найширше використовують каталізатори на основі благородних металів (платина, паладій, рутеній, родій і ін.). Ці каталізатори характеризуються хорошою селективністю в реакціях нейтралізації токсичних компонентів, низькими температурами початку ефективної роботи, достатньою температуростійкістю, довговічністю і здатністю стійко працювати при високих швидкостях газового потоку. Основний недолік каталізаторів цього типу – їх висока вартість. Рутеній, родій і іридій широко використовують як добавки до платинових і паладієвих каталізаторів, здатних працювати в широкому діапазоні зміни складу робочої суміші двигуна.

На сьогодні розроблено конструкції каталітичних допалюючих елементів, в яких каталізатором є металева дрітина, що покрита сумішшю оксидів алюмінію та берилію з додаванням 1% платини або паладію (нанесених на пористі носії з малим гідравлічним опором). Було доведено, що при виготовленні низьковідсоткових (дешевих) паладійових та платинових каталізаторів допалювання вихлопних газів, хімічна природа носія і структура його пор мають визначний вплив на активність каталізатора. Оптимальним носієм для дешевих каталізаторів є $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

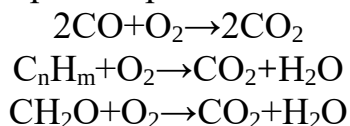
Другим поширеним каталізатором є потрійний оксидний алюмінієво-мідно-хромовий каталізатор, який за своєю активністю поступається тільки платині та паладію. Такі нейтралізатори встановлюють на вихлопних трубах двигуна. Основними вузлами нейтралізаторів є: вхідний патрубок; ежектор; каталізатор; внутрішня рамка реактора; зовнішня рамка реактора.

Ежектор призначений для підсмоктування повітря, а також для приєднання реактора до вихлопної труби.

В корпусі ежектора відпрацьовані гази захоплюють повітря, примушуючи його рухатись із атмосфери в нейтралізатор. Додатково повітря потрапляє через фільтр, який захищає нейтралізатор від великих твердих частинок. Реактор призначений для розміщення каталізатора і складається із зовнішньої та внутрішньої решітки, дна і

засипної горловини. Решітки виготовляють з перфорованого сталевого листа, до якого приєднана сітка (у формі циліндрів, вкладених один в одну). Між решітками утворюється кільцевий зазор, в який засипають каталізатор. Решітки з'єднують з дном реактора.

Суміш газів з повітрям із ежектора потрапляє у внутрішню решітку реактора, де фільтрується через шар каталізатора, який розміщений між внутрішньою та зовнішньою решітками. Каталізатор нагрівається вихлопними газами і в ньому починається контактне окислення цих газів. Хімічні процеси, які протікають на поверхні каталізатора, можна зобразити рівняннями:



Для нейтралізації у відпрацьованих газах NO_x , CO і C_nH_m ефективним є застосування двоступінчатого каталітичного нейтралізатора, в якому для окислення CO і C_nH_m використовують такі каталізatori, як платина і паладій, а для зменшення вмісту оксидів азоту як каталізатор використовується родій. Для відновлення оксиду азоту застосовують каталізatori на основі перехідних металів, зокрема міді, хрому, кобальту, нікелю і їх сплавів. Ці каталізatori менш довговічні, аніж платина Pt і паладій Pd ; їх ефективність помітно нижче при високих об'ємних швидкостях хімічних реакцій; ефективна нейтралізація продуктів неповного згорання досягається на таких каталізаторах при вищих температурах, ніж на платинових. Тому, не дивлячись на високу вартість, для каталітичної нейтралізації відпрацьованих газів частіше використовують каталізatori на основі благородних металів.

Двоступінчатий каталітичний нейтралізатор складається з послідовно сполучених відновного 1 і окислювального 2 каталізаторів. Відпрацьовані гази через патрубок поступають до відновного каталізатора (рис. 11.3).

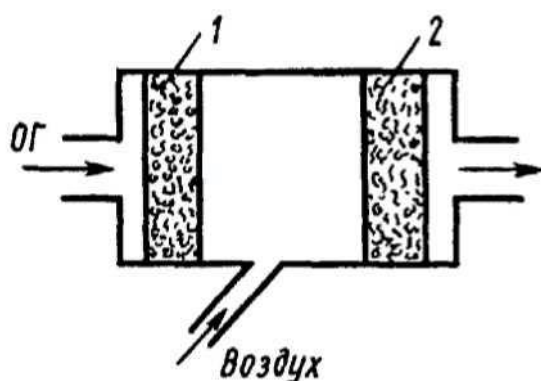
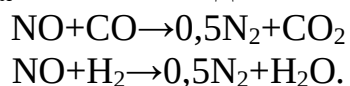


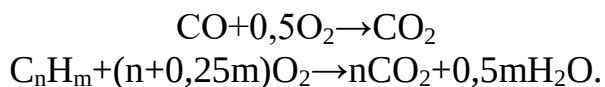
Рис. 11.3. Схема двоступінчатого каталітичного нейтралізатора

На цьому каталізаторі нейтралізація оксидів азоту відбувається за реакцією (для ДВЗ з іскровим запаленням NO_x на 99% складається з NO):



Після відновного каталізатора до відпрацьованих газів для створення окислювального середовища підводиться через патрубок вторинне повітря. На окислювальному каталізаторі відбувається нейтралізація продуктів неповного

згорання CO і C_nH_m. Основними процесами є окислення оксидів вуглецю і вуглеводнів:



Результати випробувань автомобіля з двоступінчатим каталітичним нейтралізатором (на 1-му ступені – міднонікелевий сплав, на 2-му – платина) приведені в табл. 11.4.

Таблиця 11.4

Результати випробувань автомобіля з каталітичним нейтралізатором

Автомобіль	Концентрація токсичних речовин		
	NO _x , мг/м ³	C _n H _m , %	CO, мг/м ³
Без нейтралізатора	1759	100	9100
З нейтралізатором	283	46	3500

Застосовують в основному окислювальні каталітичні нейтралізатори. Ефективність роботи нейтралізатора, його масові і габаритні показники, створюваний ним протитиск випуску ВГ залежать в основному від характеру протікання газодинамічних і масообмінних процесів.

Однією із основних задач при проектуванні нейтралізатора є визначення довжини каталітичного шару, через який проходять гази в процесі нейтралізації. У загальному випадку довжина шару, необхідна для досягнення заданого ступеня очищення, залежить від швидкості кінетичних перетворень і швидкості потоку. Проте, внаслідок великої швидкості реакції, що досягається на платинових каталізаторах в області малих концентрацій оксиду вуглецю, основним чинником, що визначає загальну швидкість її окислення, стає дифузія. Практично це означає, що розрахунок каталітичних нейтралізаторів для знешкодження продуктів неповного згорання ВГ можна без великої погрішності виконувати, враховуючи тільки процеси масопередачі в дифузійній області.

Розрахунок профілю концентрацій по довжині шару гранульованого каталізатора проводиться за формулою:

$$\frac{c_x}{c_0} = \exp \left[- \frac{a \cdot x}{1,38 \cdot Sc^{2/3} \cdot (Re^{0,41} - 1,5)} \right],$$

де c_x – поточна концентрація компоненту по координаті x ;
 c_0 – початкова концентрація компоненту на вході в реактор;
 $a = 6(1 - \varepsilon)/d_k$ – питома поверхня насипного каталізатора;
 ε – пористість шару каталізатора;
 d_k – діаметр окремої гранули насипного шару каталізатора;
 $Sc = \nu/D$ – число Шмідта;
 ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості;
 D – коефіцієнт дифузії;
 $Re = w \cdot d/\nu$ – число Рейнольдса;
 w – середня швидкість перебігу газу через канали, що створюють шар.

Ступінь очищення ВГ від шкідливих речовин при $x=l$ складе $\eta = 1 - c_l/c_0$, де l – довжина шару каталізатора.

Повний опір нейтралізатора включає втрати тиску на вході, активній зоні і виході:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{\text{вх}} + \Delta p_{\text{акт}} + \Delta p_{\text{вих}}.$$

Втрати на вході $\Delta p_{\text{вх}}$ і виході $\Delta p_{\text{вих}}$ визначають за формулами гідравліки, а втрати тиску в активному шарі – за рівняннями:

$$\Delta p_{\text{акт}} = \frac{\zeta_c \cdot \rho \cdot w^2 \cdot l}{2 \cdot d_{\kappa}},$$

$$\text{де } \zeta_c = \frac{152}{\text{Re}_{\kappa}} \cdot (1 + 0,0056 \cdot \text{Re}_{\kappa}^{0,9} \cdot \varepsilon^{-1,72}).$$

Як швидкість при визначенні числа Рейнольдса Re_{κ} необхідно використовувати швидкість газу в порах, рівну $w = Q_{\varepsilon} / (F_{\kappa} \cdot \varepsilon)$, де Q_{ε} – витрати відхідних газів; F_{κ} – площа поперечного перерізу каталізатора з пористістю ε . Число Рейнольдса визначають за співвідношенням $\text{Re}_{\kappa} = w d_n / \nu$, де $d_n = 2 \varepsilon d_{\kappa} / [(1 - \varepsilon)^3]$.

Газодинаміка шару каталізатора є лише одним з чинників, що визначають аеродинамічні характеристики нейтралізатора в цілому. Зокрема, рівномірність розподілу газу по поверхні шару залежить не стільки від абсолютної втрати тиску в ньому, скільки від відношення кінетичної енергії потоку газу у вхідній порожнині над реактором до перепаду тиску на шарі. Це відноситься і до вихідної порожнини нейтралізатора.

Прийнятний для практичних цілей рівномірний розподіл потоку газу досягається, якщо виконується умова $\Delta p_{\text{вх}} / \Delta p_{\text{акт}} < 0,15 \dots 0,2$. Враховуючи цю умову, а також вимоги компактності ступінь розширення вхідного дифузора вибирають в межах 2...2,5.

Експериментальні дослідження дозволяють сформулювати достатньо прості правила, яких треба дотримуватися при проектуванні каталітичних нейтралізаторів: довжина гранульованого шару каталізатора для карбюраторного ДВЗ повинна складати 10...15 діаметрів гранули, а для дизельного в 2...2,5 рази більше; приведена до нормальних умов швидкість газу по повному перерізу реактора (швидкість фільтрації) не повинна перевищувати 1 м/с.

Каталітичні нейтралізатори конструктивно складаються з вхідного і вихідного пристроїв, корпусу і вкладеного в нього реактора. Розроблені каталітичні нейтралізатори (рис. 11.4) для відпрацьованих газів ДВЗ транспортних засобів з бензиновими і дизельними двигунами. Каталітичні нейтралізатори знижують у ВГ вміст CO на 70...90%, C_nH_m – на 50...85%.

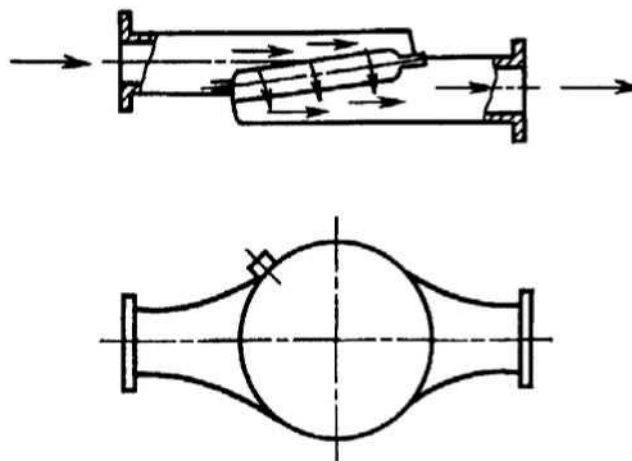


Рис. 11.4. Каталітичний нейтралізатор для бензинового ДВЗ

Схема установки каталітичного нейтралізатора в системі ДВЗ показана на рис. 11.5. Відпрацьовані гази від двигуна 1 надходять по випускній трубі 2 до каталітичного нейтралізатора 3, після чого викидаються в атмосферу. Для підтримки необхідної температури газів в нейтралізаторі використовується електронний блок 4, регулюючий клапаном 5 подачу повітря через ресивер 6 і зворотний клапан 7 з атмосфери в нейтралізатор.

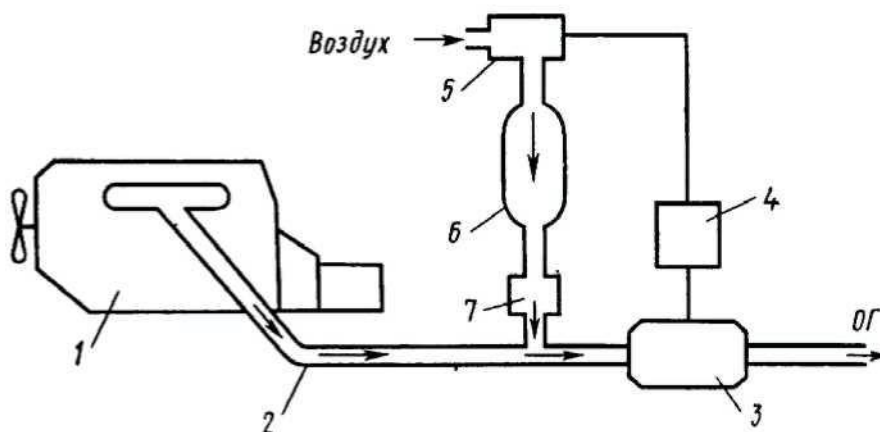


Рис. 11.5. Схема установки каталітичного нейтралізатора

Таким чином, каталітичне допалювання вихлопних газів двигунів внутрішнього згорання є ефективним (до 90%) засобом для очистки повітря від вуглеводнів, карбоксиду та альдегідів.

11.4. Вловлювання аерозолів, що викидаються дизельним двигуном

Для вловлювання сажі в дизельних ДВЗ відомо декілька конструкцій пристроїв, що використовують як принцип електростатичного очищення, так і метод фільтрації.

Суть проблеми, пов'язаної з вловлюванням частинок сажі з потоку вихлопних газів, полягає в тому, що ці частинки дуже малих розмірів – діаметр половини з них менше 5 мкм, густина їх також низка – $0,05 \text{ г/см}^3$. Як правило, вихід аерозоля складає від 0,1 до 0,5% маси палива. Отже, традиційні фільтри швидко забиватимуться.

Одним з кращих конструктивних рішень для зниження вмісту твердих частинок у вихлопі дизельних двигунів вважається установка фільтрів регенеративного типу. Фільтр (рис. 11.6, а) є стільниковою конструкцією з чарунками прямокутного перетину. Пористий матеріал фільтру володіє достатньою механічною міцністю, стійкістю до агресивних хімічних речовин, опором до оплавлення і утворення тріщин при теплових діях, а також термічною стабільністю.

Фільтр (рис. 11.6, б), виконаний у вигляді декількох послідовно розташованих пористих перегородок, володіє підвищеною ефективністю очищення.

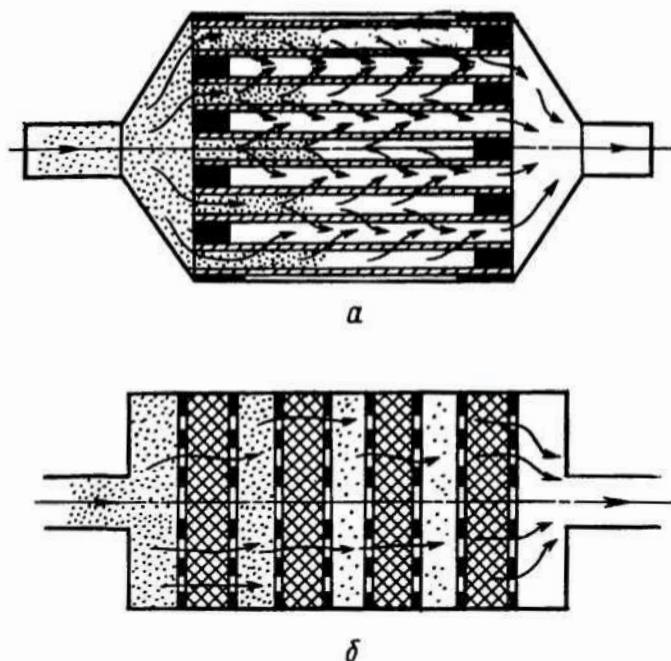


Рис. 11.6. Схема фільтрів-сажевловлювачів
а — з сотовою насадкою; *б* — з багатошаровою насадкою

Частинки, що накопичилися у фільтрі, слід періодично видаляти переважно термічним окисленням. Для цього відхідні гази нагрівають до 450°C і вище, що призводить до займання сажі, що накопичилася. Дані, отримані при проведенні експерименту з дизелем робочим об'ємом 2,3 л, по визначенню концентрації основних домішок у відпрацьованих газах дизеля, приведені в табл. 11.5.

Таблиця 11.5

Експериментальні дані випробувань дизельного двигуна

Схема випуску відпрацьованих газів	Концентрація, г/км			
	Вуглеводні C_nH_m	CO	NO _x	тверді частинки
Без фільтру	0,312	0,937	0,784	0,169
З чистим керамічним фільтром	0,337	0,931	0,700	0,031

Сажевловлювачі дизельних ДВЗ повинні забезпечувати ресурс 10000 км і більше при незначному збільшенні гідравлічного опору, що забезпечується періодичною (приблизно через 100 км пробігу) регенерацією фільтроелементу. Конструктивно фільтроелементи виконують у вигляді багатоканальних моноблоків, об'ємно-дротяних елементів і у вигляді намотаних на перфоровану трубу склокерамічних ниток, що допускають регенерацію при 600°C.

Розділ 12

Оцінка ефективності очищення газових викидів

12.1. Оцінка ефективності пристроїв для очищення газових викидів

Екологічна досконалість очисного устаткування визначається відношенням досягаемого рівня знешкодження і екологічно прийняттого рівня забруднення біосфери. Об'єктивним критерієм останнього служить темп природної зміни якості атмосфери, що характеризується параметром мінливості R :

$$R = \frac{d \cdot C}{C_0 \cdot d \cdot \tau},$$

де C_0 і τ – початкова концентрація речовини і час спостереження за її зміною.

Оцінка ефективності роботи очисних пристроїв по ГДК зручна, але екологічно малоінформативна. Проте не це перешкоджає розповсюдженню санітарно-гігієнічного методу оцінки ефективності очисних пристроїв, заснованого на порівнянні досягаемого рівня знешкодження з ГДК. Неузгодженість в тому, що обробка викидів сучасними методами дозволяє зменшити концентрації шкідливих домішок більш ніж на 95%, та все ж їх значення залишаються на 4...5 порядків вище і більше за нормативи ГДК.

Подальше пониження концентрацій забруднювачів до рівня, порівняного з ГДК, обійшлося б дуже дорого.

Так, наприклад, мінімальна кількість енергії, необхідна для конденсації одиниці маси (1 кг) гомогенної домішки, чисельно рівна роботі процесу ізотермічного оборотного стиснення її об'єму від парціального тиску p_n до тиску насичення $p_{нас}$:

$$A = 2,303 \cdot R \cdot T \cdot \lg \left(\frac{p_{нас}}{p_n} \right),$$

де A – робота стиснення, Дж/кг;

R – газова стала, Дж/(кг·К);

T – абсолютна температура суміші, К.

Прийнявши за порядком величини тиску газових викидів і $p_{нас}$ близькими до атмосферного, а ГДК_{сд} забруднювача близько $10^{-50}\%$ об. (10^{-7} об. доль), обчислимо співвідношення витрат енергії K на компресію домішки з концентрацією, порівнянною з ГДК_{сд}, наприклад, $10^{-40}\%$ об. (10^{-6} об. доль) і із звичайною для промислових гомогенних забруднювачів концентрацією $10^{-1}\%$ об. (10^{-3} об. доль). Парціальний тиск домішки в даних випадках складе: $p_1 = 101325 \cdot 10^{-6} = 0,1013$ Па і $p_2 = 101325 \cdot 10^{-3} = 101,325$ Па, а співвідношення витрат енергії буде рівне:

$$K = \frac{2,303 \cdot R \cdot T \cdot \lg \left(\frac{101325}{0,1013} \right)}{2,303 \cdot R \cdot T \cdot \lg \left(\frac{101325}{101,325} \right)} = \frac{6}{3} = 2.$$

Таким чином, енергетичні затрати на видалення однакової кількості забруднювача за допомогою конденсації логарифмічно зростають з пониженням його концентрації. Аналогічна залежність характерна і для сорбційних методів очищення, основою яких також є конденсація домішок.

Хімічні (у тому числі і термоокислювальні) методи обробки викидів характеризуються зростанням витрат енергії з пониженням початкових концентрацій забруднювачів як на одиницю оброблюваної маси, так і на процес в цілому внаслідок зменшення швидкості реакції:

$$w = k \cdot A^a \cdot B^b,$$

де a і b – стехіометричні коефіцієнти рівняння реакції з вихідними реагентами A і B ; w, k – швидкість і константа швидкості прямої реакції.

Для забезпечення колишнього ступеня завершеності при уповільненні перетворення речовин необхідно підвищити температурний рівень процесу, компенсуючи коефіцієнт проскакування забруднювача через n -ий апарат; пониження концентрації забезпечується збільшенням константи швидкості реакції або інтенсифікувати процес за рахунок підведення механічної енергії.

У ряді випадків для очищення пилогазових викидів застосовують термохімічні, термokatалітичні, хемосорбційні і інші способи обробки, які по суті є скомбінованими з розглянутих вище. Процеси, що відбуваються при цьому, матимуть ще складніший характер, проте принцип зростання затрат енергії із збільшенням глибини очищення справедливий і для них.

З цієї причини рівень знешкодження пилогазових викидів встановлюється виходячи з економічних міркувань, а не по екологічних або санітарно-гігієнічних вимогах.

У економічно допустимих межах досконалість сучасних пилогазоочисних пристроїв прийнято оцінювати за ступінем (коефіцієнтом) очищення:

$$\eta = \frac{M_n - M_k}{M_n} \cdot 100 = \frac{C_n \cdot V_n - C_k \cdot V_k}{C_n \cdot V_n} \cdot 100 = \left(1 - \frac{C_k \cdot V_k}{C_n \cdot V_n}\right) \cdot 100\%,$$

де M_n, C_n, V_n – маса, середня концентрація забруднювача і витрата газових викидів до очищення;

M_k, C_k, V_k – те ж, після очищення.

У ряді конкретних випадків можна прийняти з достатньою для практичних розрахунків точністю $V_n = V_k$; тоді

$$\eta = \left(1 - \frac{C_k}{C_n}\right) \cdot 100\%.$$

Якщо відхідні гази послідовно обробляються в декількох апаратах, то коефіцієнт очищення визначають з виразу:

$$\eta = 100 - \prod_{n=1}^N \varepsilon_n,$$

де $\varepsilon_n = 100 - \eta_n$ – коефіцієнт проскакування забруднювача через n -ий апарат;

η_n – коефіцієнт очищення в n -му апараті;

N – кількість апаратів.

Ці співвідношення справедливі для викидів, що містять один гомогенний забруднювач, при обробці якого не утворюється нових токсичних сполук. Для багатокомпонентних сумішей ці формули можна застосовувати, якщо спосіб знешкодження має однакові коефіцієнти очищення по всіх інгредієнтах. Проте на практиці доводиться мати справу з селективністю очисних пристроїв по забруднювачам.

Можливість використання того або іншого типу пристрою для знешкодження викидів певного складу встановлюється за повним коефіцієнтом очищення, для

підрахунку якого необхідні дані про селективні коефіцієнти очищення даного апарату.

Стосовно гомогенних газових викидів вираз для визначення селективних (парціальних) коефіцієнтів очищення представляється дещо в іншому вигляді, ніж для пилогазових викидів, оскільки склад гомогенних забруднювачів на відміну від дисперсних зручніше відносити до всієї кількості відхідних газів:

$$\eta = \frac{\Delta M_i}{M_{in}} \cdot 100 = \frac{C_{in} \cdot V_n - C_{ik} \cdot V_k}{C_{in} \cdot V_n} \cdot 100 = \left(1 - \frac{C_{ik} \cdot V_k}{C_{in} \cdot V_n} \right) \cdot 100\%.$$

Якщо початкові і кінцеві витрати газових викидів можна прийняти однаковими, то

$$\eta = \left(1 - \frac{C_{ik}}{C_{in}} \right) \cdot 100\%.$$

Тут M_{in} , ΔM_i – вихідна і вловлена кількість i -того забруднювача;
 C_{in} , C_{ik} – початкова і кінцева концентрації i -того забруднювача у складі газових викидів.

Після вирішення питання про селективні коефіцієнти очищення можна підрахувати повний коефіцієнт очищення η_{Σ} (склад забруднювачів повинен бути заданий або визначений заздалегідь):

$$\eta_{\Sigma} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N C_{in} \cdot \eta_{in}}{\sum_{i=1}^N C_{in}} \right) \cdot 100\%.$$

Менше всього розроблена проблема оцінки досконалості способів обробки, пов'язаних з хімічними перетвореннями забруднювачів. Ігнорування конкретних властивостей вихідних реагентів і термодинамічно можливого набору кінцевих продуктів може обернутися тяжкими наслідками, оскільки часто продукти реакції не нешкідливі, а іноді і токсичніші, ніж вихідні компоненти.

Такі помилки типові при оцінці методу термічного знешкодження, який часто розглядається як універсальний засіб. Якщо термознешкодженню піддаються токсичні органічні речовини – альдегіди, кетони, органічні кислоти, ароматичні сполуки, молекули яких містять тільки атоми С, Н і О, то при правильній організації процесу спалювання вони майже повністю окислюються до практично нешкідливих CO_2 і H_2O . Разом з тим в процесі горіння утворюються оксиди азоту NO і NO_2 , які самі по собі менш токсичні, ніж вихідні сполуки, але по дії на біосферу можуть бути прирівняні з формальдегідом, акролеїном, оксидами сірки і іншими сполуками, що беруть участь в утворенні сульфатних і фотохімічних смогів. Формальний розрахунок ступеня знешкодження по початкових забруднювачах може показати картину глибокого очищення шкідливих викидів, тоді як облік оксидів азоту, що утворилися, допоможе виявити реальну ситуацію. Якщо ступінь очищення викидів виявиться при цьому недостатнім (наприклад, при високих концентраціях оксидів азоту, характерних для енергетичних парогенераторів і високотемпературних печей), то може виникнути питання про двоступінчате очищення і, отже, про додаткові витрати засобів. При такому варіанті рішення задачі повний коефіцієнт очищення можна підрахувати за формулою:

$$\eta = 100 - \prod_{n=1}^N \varepsilon_n ,$$

що враховує результати обох ступенів знешкодження.

Коефіцієнт очищення служить перш за все показником інтенсивності процесів, що протікають в очисному пристрої. Показників екологічної або санітарно-гігієнічної досконалості апаратів знешкодження на даний час немає, а їх розробка пов'язана з ускладненнями принципового характеру, які зазначались раніше. Сумнівно також, що такого роду показники виявляться кориснішими, оскільки застосовувати некомпетентно можна як прості, так і найскладніші методики розрахунків.

12.2. Вибір варіантів газоочистки

Сучасні технічні засоби обробки технологічних газових викидів не забезпечують їх повного знешкодження або відновлення первинної якості повітря, використаного у виробничому циклі. Тому відпрацьовані гази завжди вносять до атмосфери частину відходів виробництва.

Прості методи обробки викидів сучасних виробничих процесів також швидше за все не забезпечать належного ступеня очищення, що могло б запобігти відчутним збиткам навколишньому середовищу. Не варто розраховувати на те, що можна буде обійтися примітивними пристроями при постановці завдання знешкодження гомогенних забруднювачів. Такими методами, як зрошування газових потоків в каналах і камерах, неможливо досягти глибокого знешкодження гомогенних викидів, а існуючі проблеми доповняться при цьому необхідністю очищати забруднені стоки.

При постановці завдання проектування повинні бути охоплені всі забруднювачі, які можуть бути присутніми у викидах, для чого необхідно ретельно проаналізувати склад викидів, виділивши нейтральну частину і компоненти, які можуть завдати збитки навколишньому середовищу.

Строго кажучи, нешкідливими компонентами викидів щодо атмосферного повітря можна рахувати тільки азот N_2 і кисень O_2 , проте на практиці до них відносяться також вуглекислий газ (діоксид вуглецю) CO_2 і водяні пари H_2O як нетоксичні сполуки.

Решту всіх компонентів слід або знешкоджувати, тобто перетворити яким-небудь чином на вказані вище нешкідливі сполуки, або видалити. Таким чином, в наближеному до ідеального варіанту викид не повинен містити ніяких інших компонентів, окрім N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O .

Всі компоненти, що підлягають видаленню, необхідно оцінити за фізико-хімічними і санітарно-гігієнічними властивостями. Слід звернути увагу на агрегатний стан і термодинамічні параметри забруднювачів, їх реакційну здатність або каталітичні властивості в атмосферних хімічних і фотохімічних процесах, ступінь небезпеки дії на живі організми.

Для газоподібних забруднювачів важливі дані про температури кипіння і деструкції, критичні параметри, теплоти фазових переходів, характеристики розчинення і ін. (наприклад, для горючих газів – про температури спалаху і займання, теплоту згорання, концентраційні межі займання).

Найбільш складні для очищення викиди, забруднювачі яких представляють багатофазну систему. Оскільки більшість сучасних очисних апаратів не пристосована для одночасного знешкодження дисперсних і гомогенних забруднювачів, то в загальному випадку подібні викиди повинні пройти послідовно 4 стадії обробки: попереднє і тонке очищення від аерозоля і потім попереднє і остаточне знешкодження газоподібного забруднювача. Зокрема, якщо газоподібний забруднювач добре розчиняється у воді, може бути організована попередня обробка викидів мокрими способами, яка дозволить знизити концентрації як дисперсних, так і гомогенних забруднювачів.

Для очищення викидів від газоподібних забруднювачів найчастіше застосовують методи конденсації, абсорбції, адсорбції і термознешкодження.

Якщо температура кипіння забруднювачів при атмосферному тиску невисока (орієнтовно нижче 100°C), то глибоке очищення за допомогою охолодження і підвищення тиску потребує надмірно високих затрат енергії, і конденсаційне очищення можна використовувати тільки як попереднє.

Обробці абсорбції можуть бути піддані викиди, забруднювачі яких добре розчиняються в абсорбенті. Якщо при цьому концентрація забруднювача у викидах перевищує $(1...2) \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$, то технічно можливо досягти ступінь очищення вище 90%.

Як абсорбент найчастіше використовуються вода або органічні рідини, киплячі при високій температурі. У апаратах з органічними абсорбентами можна обробляти викиди, що не містять твердих домішок, які практично не піддаються відділенню від поглинювальної рідини. Для деяких газових забруднювачів можна успішно застосувати хімічну абсорбцію (хемосорбцію) – процес, в якому підлягаючий видаленню забруднювач вступає в хімічну реакцію з поглиначем і утворює нейтральну сполуку або таку, що легко вилучається з процесу. Такі процеси специфічні і розробляються конкретно для кожного виду викидів і набору забруднювачів.

Самим універсальним засобом очищення викидів від газоподібних забруднювачів на сьогодні залишається адсорбція, а найбільш універсальним адсорбентом – активоване вугілля. За допомогою адсорбції принципово можливо витягувати з викидів будь-який забруднювач в широкому діапазоні концентрацій. Проте, висококонцентровані забруднювачі (орієнтовно з концентраціями вище $5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$) зручніше піддавати попередній обробці (конденсацією, абсорбцією) для зниження їх концентрацій. Необхідна також попередня обробка (осушення) сильно зволжених газів.

Часто як універсальний засіб очищення викидів розглядається термознешкодження, яким воно насправді не є. У термоокислювальних процесах необоротно втрачається якість повітря, використаного для горіння, а продукти окислення, що викидаються в атмосферу, містять певну кількість нових токсичних речовин – оксиду вуглецю CO і оксидів азоту NO_x . Загалом область застосування термознешкодження обмежена тільки сполуками, в молекулах яких немає інших елементів, окрім вуглецю C , водню H і кисню O . Отримати нетоксичні продукти реакції будь-яких інших сполук з киснем принципово неможливо. Термоокислювальна обробка викидів, забруднених вуглеводнями або КПВ (кисневими похідними вуглеводнів), обмежується також витратами палива на

створення необхідних температур в зоні реакції (400...550°C для термokatалітичної обробки і 800...1200°C для безпосереднього термоокислення, тобто спалювання в полум'ї).

До перспективних способів обробки великих об'ємів викидів з невисокими концентраціями органічних газоподібних забруднювачів можна віднести схему термознешкодження з попередньою концентрацією забруднювачів за допомогою адсорбції. Така схема може бути технічно і економічно прийнятною при початковій концентрації забруднювача вище 50 мг/м³. Теплоту, що виділяється при згоранні забруднювачів, можна достатньо легко утилізувати. Якщо концентрація горючих забруднювачів може бути доведена орієнтовно до $(5...6) \cdot 10^{-3}$ кг/м³, то термообробку можна організувати з незначним додаванням палива, а при вищих концентраціях можна чекати і економічної ефективності роботи установки.

Представляються перспективними способи обробки відхідних газів, засновані на переведенні пароподібних забруднювачів в конденсуючий стан і подальшій фільтрації утвореного аерозолі. Якщо забруднювачі мають невисокий тиск насиченої пари, то може бути прийнятною конденсація за допомогою підвищення тиску і пониження температури викидів. Пари забруднювачів легкокиплячих речовин можуть бути піддані обробці хімічними реагентами так, щоб продукти реакції мали низький тиск насиченої пари. Часто при цьому способи хімічної обробки вдається підібрати так, щоб була можлива утилізація вловлюваного продукту.

ЧАСТИНА ІІІ
ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ ВІД
АЕРОЗОЛЬНИХ ПИЛОВИХ ВИКИДІВ

Розділ 13

Методи і системи очищення повітря від аерозолів

13.1. Характеристики аерозольних викидів в атмосферу

Під атмосферним забрудненням розуміють присутність в повітрі газів, пари, частинок, твердих і рідких речовин, тепла, коливань, випромінювань, які несприятливо впливають на рослини, тварини, людину, клімат, матеріали, будівлі і споруди.

Забруднення атмосфери може відбуватися як внаслідок перетворення її компонентів, так і перенесення забруднюючих речовин з інших частин біосфери. Ці процеси можуть мати природний або антропогенний характер.

Речовини, що потрапляють в атмосферу безпосередньо через людську діяльність, зазвичай відносять до антропогенних викидів і забруднювачів.

Викиди в атмосферу розрізняють за виглядом, складом, кількістю, агрегатним станом, характером появи і перебування в атмосфері, впливом на біосферу і безліччю інших ознак. Класифікації антропогенних викидів, яка була б придатною для вивчення їх властивостей з метою підбору способів очищення, поки що немає. У стандартній класифікації забруднювачі розділені на 4 класи за агрегатним станом: газо- і пароподібні, рідкі, тверді і змішані. За хімічним складом вони поділяються на групи, а залежно від розміру частинок – на підгрупи. Наприклад, тверді викиди підрозділяються на 4 підгрупи з розмірами частинок, мкм: менше 1; 1...10; 10...50 і більше 50.

У атмосферу Землі щорічно поступає 150 млн. тон різних аерозолів, близько 1 куб. км пилоподібних частинок штучного походження. Ще більша різноманітність властива органічному пилу, що включає аліфатичні і ароматичні вуглеводні, солі кислот. Він утворюється при спалюванні залишкових нафтопродуктів, в процесі піролізу на нафтопереробних, нафтохімічних і інших подібних підприємствах.

В основному існують два основні джерела забруднення атмосфери:

- стаціонарні джерела (промислові підприємства, паливно-енергетичний комплекс, сільське господарство, гірничодобувна промисловість);
- пересувні джерела (транспорт).

Основними джерелами штучних аерозольних забруднень повітря є ТЕС, які споживають вугілля високої зольності, збагачувальні фабрики, металургійні, цементні заводи. Аерозольні частинки від цих джерел відрізняються великою різноманітністю хімічного складу. Найчастіше в їх складі виявляються сполуки кремнію, кальцію і вуглецю, рідше – оксиди металів: заліза, магнію, марганцю, цинку, міді, нікелю, свинцю, вісмуту, селену, миш'яку, берилію, кадмію, хрому, кобальту, молібдену. Джерелом пилу і отруйних газів слугують масові вибухові роботи. Так, в результаті одного середнього по масі вибуху (250...300 тон вибухових речовин) в атмосферу викидається близько 2 тис. куб. м. умовного оксиду вуглецю і більше 150 т. пилу. Виробництво цементу і інших будівельних матеріалів також є джерелом забруднення атмосфери пилом. Основні технологічні процеси цих виробництв – подрібнення і хімічна обробка шихт, напівфабрикатів і отримуваних

продуктів в потоках гарячих газів завжди супроводжується викидами пилу і інших шкідливих речовин в атмосферу.

Тверді компоненти аерозолів у ряді випадків особливо небезпечні для організмів, а у людей викликають специфічні захворювання.

Забруднення повітря викликає значні економічні втрати. Запиленість і загазованість повітря у виробничих приміщеннях призводить до зниження продуктивності праці, втрати робочого часу через збільшення захворюваності. У багатьох виробництвах наявність пилу в повітряному середовищі погіршує якість продукції, прискорює знос устаткування. В процесі виробництва, видобутку, транспортування багатьох видів матеріалів, сировини, готової продукції частина цих речовин переходить в пилоподібний стан і втрачається (вугілля, руда, цемент і ін.), забруднюючи при цьому навколишнє середовище. Збитки ряду підприємств складають до 3...5%. Також це призводить до значних збитків через забруднення навколишнього середовища. Заходи, які спрямовані на зменшення наслідків забруднення обходяться дорого.

На підприємствах мають місце організовані (через труби, вентиляційні шахти і т. п.) і неорганізовані викиди (через ліхтарі і отвори в цехах, від місць вантаження і розвантаження транспорту, через витоки в комунікаціях і ін.). Неорганізовані викиди на думку фахівців складають від 10 до 26% від загальної кількості викидів в атмосферу.

Надходження в повітряне середовище виробничих приміщень і викиди в атмосферу аерозолів і інших шкідливих речовин – результат недосконалості технологічного і транспортного устаткування, в першу чергу, його негерметичності, а також відсутності або недостатньої ефективності пиловловлюючих і локалізуючих пристроїв і систем.

Аерозоль є дисперсною системою, в якій дисперсним середовищем є газ, зокрема, повітря, а дисперсною фазою – тверді або рідкі частинки. Найбільш дрібні (тонкі) аерозольні частинки за розмірами близькі до крупних молекул, а для найбільш великих їх розмір визначає здатність знаходитися в зваженому стані.

В атмосфері аерозольні забруднення спостерігаються у вигляді диму, туману, мли або серпанку. Значна частина аерозолів утворюється в атмосфері при взаємодії твердих і рідких частинок між собою або з водяною парою. Середній розмір аерозольних частинок складає 1...5 мкм.

До аерозолів відносяться пил, тумани і дими.

Пилом називають дисперсійні аерозолі з твердими частинками, незалежно від дисперсності. Пилом зазвичай також називають сукупність частинок, що осіли (гель або аерогель).

Під туманами розуміють газоподібне середовище з рідкими частинками як конденсаційними, так і дисперсійними, незалежно від їх дисперсності.

Димами називають конденсаційні аерозолі з твердою дисперсною фазою або фазою, що включає тверді і рідкі частинки.

У процесах пиловловлювання важливими є фізико-хімічні характеристики пилу і туманів, а саме: дисперсний (фракційний) склад, густина, адгезійні властивості, змочуваність, електрична зарядженість частинок, питомий опір шарів частинок і ін. Для правильного вибору пиловловлюючого апарату перш за все необхідними є відомості про дисперсний склад пилу і туманів.

Аерозолі зазвичай полідисперсні, тобто містять частинки різних розмірів.

Дисперсність – ступінь подрібнення речовини. Під дисперсним (зерновим, гранулометричним) складом розуміють розподіл частинок аерозолів за розмірами. Він показує, з частинок якого розміру складається даний аерозоль, і масу або кількість частинок відповідного розміру.

Дисперсність значною мірою визначає властивості аерозолів. В результаті подрібнення змінюються деякі властивості речовини і отримуються нові. Це викликано, в основному, тим, що при диспергуванні речовини багато разів збільшується його сумарна поверхня.

Дисперсний склад пилу має першочергове значення для розробки і вдосконалення пиловловлюючих апаратів і систем, а також для здійснення заходів щодо запобігання виділенню пилу і його розповсюдження.

Інтервал дисперсності аерозольних частинок вельми широкий: від 10^{-7} до 1 см. Нижня межа визначається можливістю тривалого самостійного існування малих частинок; верхня межа обмежена тим, що крупні частинки швидко осідають під дією сил тяжіння і в зваженому стані практично не спостерігаються.

Весь діапазон розмірів частинок розбивають на фракції. Під фракцією розуміють масові (рахункові) долі частинок, що містяться в певному інтервалі розмірів частинок. Наприклад, застосовують наступну шкалу розмірів пилових частинок: 1 – 1,3 – 1,6 – 2,0 – 2,5 – 3,2 – 4,0 – 5,0 – 6,3 – 8,0 – 13 – 16 – 20 – 25 – 32 – 40 – 50 – 63 мкм.

Дисперсний склад пилу представляють у вигляді таблиці або графіка.

У таблиці дається розподіл пилу по фракціях у відсотках від загальної маси. Приклад приведений в таблиці 13.1.

Таблиця 13.1

Дисперсний склад пилу

Розмір частинок на межі фракцій, мкм	<1,5	1,5...2,5	2,5...5	5...7,5	7,5...10	10...15	15...25	25...35	35...50	>50
Фракції, % від загальної маси частинок	2,19	3,73	7,89	13,16	15,45	21,13	18,63	6,06	5,1	6,66

Результати визначення дисперсного складу можуть бути представлені у вигляді таблиці, в якій приведені відсотки маси або числа частинок, з розмірами менше або більше заданого. Приклад – таблиця 13.2.

Таблиця 13.2.

Фракції пилу з частинками менше або більше заданого розміру

Розмір частинок d , мкм	1,5	2,5	4	7	10	15	25	50
Маса частинок більше d , %	97,81	94,08	86,19	70,74	49,61	30,98	17,82	6,66
Маса частинок менше d , %	2,19	5,92	13,81	29,26	50,39	69,02	82,18	93,34

Сукупність всіх фракцій аерозолю називають фракційним складом його дисперсної фази, яку можна представляти графічно. Відкладаючи по осі абсцис значення інтервалів, складових фракції, а по осі ординат – долі або процентний вміст частинок відповідних фракцій, отримують гістограми – ступінчасті графіки фракційного складу. Із зменшенням інтервалів фракцій гістограми наближаються до плавних кривих. Іноді такі криві бувають близькі формою до кривої нормального розподілу випадкових величин, яка описується двома параметрами – середнім діаметром частинок d_m і стандартним відхиленням σ від нього:

$$d_m = \frac{\sum_{i=1}^N M_i d_i}{\sum_{i=1}^N M_i}; \sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^N M_i (d_m - d_i)^2}{\sum_{i=1}^N M_i} \right]^{1/2},$$

де M_i – число частинок в i -тій фракції.

Результати визначення дисперсного складу пилу зазвичай представляють у вигляді залежності масових (іноді рахункових) фракцій частинок від їх розміру. Розподіли частинок домішок по розмірах можуть бути різними, проте на практиці вони часто узгоджуються з логарифмічним нормальним законом розподілу Гауса (ЛНР). У інтегральній формі цей розподіл описують формулою:

$$M(d_q) = \frac{100}{\lg \sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lg d_q} \exp \left[-\frac{\lg^2 \left(\frac{d_q}{d_{50}} \right)}{2 \lg^2 \sigma} \right] d(\lg d_q),$$

де $M(d_q)$ – відносна частка частинок розміром менш d_q ; d_{50} – медіанний розмір частинок, при якому долі частинок розміром більш і менш d_{50} рівні; $\lg \sigma$ – середньоквадратичне відхилення у функції ЛНР.

Графіки ЛНР частинок зазвичай будують в імовірісно-логарифмічній системі координат, поточний розмір частинок відкладають на осі абсцис, а на осі ординат – відносну частку частинок з розмірами менше d_q . Шкалу осі абсцис будують по логарифму діаметру частинок, а осі ординат – обчисленням кожного із значень шкали по рівнянню:

$$100 - M(d_q) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp \left(-\frac{y^2}{2} \right) dy,$$

$$\text{де } y = \lg \frac{d_q / d_{50}}{\lg \sigma}$$

Цифрові значення цієї функції приводяться в скороченому вигляді в табл. 13.3.

Таблиця 13.3

$M(d_q)$	y	$M(d_q)$	y
1	-2,326	50	0,0
10	-1,645	55	0,126
15	-1,282	60	0,253
15,9	-1,036	65	0,384
20	-1,00	70	0,524
25	-0,842	75	0,675
30	-0,675	80	0,842
35	-0,524	84,1	1,00
40	-0,384	85	1,036
45	-0,253	90	1,282
	-0,126	95	1,645
		100	2,326

Якщо в цій системі координат інтегральний розподіл частинок за розмірами описується прямою лінією, то даний розподіл підкоряється ЛНР. В цьому випадку $d_m = d_{50}$ знаходять як абсцису точки графіка, ордината якої рівна 50%, а $\lg y$ – з рівняння $\lg y = \lg d_{84.1} - \lg d_{50}$. Для характеристики пилу і порівняння їх між собою досить мати два параметри: d_{50} і $\lg y$. Значення d_{50} дає середній розмір частинок, а $\lg y$ –

ступінь полідисперсності пилу. У табл. 13.4 приведені значення d_{50} і $lg\sigma$ для деякого пилу.

Таблиця 13.4

Технологічний процес	Вид пилу	d_{50} , мкм	$lg\sigma$
Заточка інструменту	метал, абразив	38	0,214
Розміл в шаровій мельниці	цемент	20	0,468
Сушка вугілля в барабані	кам'яне вугілля	15	0,334
Експериментальні дослідження	кварцовий пил	3,7	0,405

За дисперсністю пил класифікують на 5 груп: I – дуже крупнодисперсний пил, $d_{50} > 140$ мкм; II – крупнодисперсний пил, $d_{50} = 40 \dots 140$ мкм; III – середньодисперсний пил, $d_{50} = 10 \dots 40$ мкм; IV – дрібнодисперсний пил, $d_{50} = 1 \dots 10$ мкм; V – дуже дрібнодисперсний пил, $d_{50} < 1$ мкм.

Важливий параметр пилу – його густина. Від густини частинок пилу залежить ефективність його осадження в гравітаційних і відцентрових пиловловлювачах.

Схильність частинок пилу до злипаємості визначається її адгезійними властивостями. Чим вища злипаємість пилу, тим вища вірогідність забивання окремих елементів пиловловлювача і налипання пилу на газоходах. Чим дрібніший пил, тим вища його злипаємість. Злипаємість пилу значно зростає при його зволоженні.

Змочуваність частинок рідиною (водою) впливає на роботу мокрих пиловловлювачів, а електрична зарядженість частинок – на їх поведінку в пиловловлювачах і газоходах.

13.2. Класифікація методів і апаратів для очищення аерозолів

Під знешкодженням газоповітряних викидів розуміють відділення від газу аерозольних домішок або перетворення на нешкідливий стан забруднюючих домішок.

Процес знепилювання повітря в загальному вигляді включає наступні основні етапи:

- запобігання розповсюдженню “початкової” аеродисперсної системи в повітрі робочої зони і збільшення стійкості цієї системи у напрямі строго обмеженої заздалегідь виділеної області (процес пиловловлювання);
- руйнування пилового аерозолу, що полягає у виділенні пилу з повітря (процес пилоочистки);
- подальше зниження стійкості пилового аерозолу, що зберігся після реалізації попередніх етапів, що полягає в інтенсифікації розповсюдження пилових частинок, що залишилися в повітрі, і аерації дисперсного середовища в приземному шарі атмосфери (процес розсіювання пилу).

На кожному етапі передбачається введення штучних аеродисперсних систем або організація направлених зовнішніх силових полів. Процес знепилювання включає три елементи: пиловловлювання (ПВ), пилоочистку (ПО) і розсіювання пилу (РП). Кожен елемент системи можна реалізувати різними методами (аеродинамічним, гідродинамічним, електромагнітним, теплофізичним, механічним і ін.), які визначаються характером направлених зовнішніх дій на пиловий аерозоль.

Будь-який метод може бути здійснений різними способами (зрошуванням, піною, паром, туманом і ін.), а спосіб – технічними засобами.

Основним елементом систем полоочистки є апарат очищення повітря від пилу.

Серед початкових даних для вибору способів, технічних засобів і параметрів пиловловлювання найбільш важливими є технологічні і пилоаеродинамічні.

Найповніша класифікація апаратів ґрунтується на використанні наступних способів знепилювання:

- фізичні способи включають: механічний (аеродинамічний, гідродинамічний, фільтраційний), електричний, магнітний, акустичний, оптичний, іонізуючий, термічний;
- хімічний;
- фізико-хімічний;
- біохімічний;
- фізико-біохімічний.

Кожен з вказаних способів має певну область застосування і широту використання. В їх основі лежить один (або декілька) з наступних процесів знепилювання: осадження, коагуляція, видалення, знезараження, спалювання і вловлювання.

Для знешкодження аерозолів (пилу і туманів) використовують сухі, мокрі і електричні методи. В основі сухих методів лежать гравітаційні, інерційні, відцентрові механізми осадження або фільтраційні механізми. При використанні мокрих методів очищення газових викидів здійснюється шляхом тісної взаємодії між рідиною і запиленним газом на поверхні газових міхурів, крапель або рідкої плівки. Електричне очищення газів засноване на іонізації молекул газу електричним розрядом і електризації зважених в газі частинок.

При обробці викидів, що містять тверді аерозольні забруднювачі, низьких величин проскакування (1...2% і менше) можна досягти, як правило, тільки двоступінчатим очищенням. Для попереднього очищення можуть бути застосовані жалюзійні решітки і циклонні апарати (іноді для невеликих викидів – пилоосаджувальні камери), а для остаточної – пористі фільтри, електрофільтри або мокрі пилоосаджувачі.

Рідкі аерозолі (тумани) можуть бути скоагульовані за допомогою зміни параметрів стану (охолодження і підвищення тиску) з метою осадження в подальшому з використанням як правило мокрих способів вловлювання в скруберах, пористих і електричних фільтрах, в абсорберах.

Мокрі способи очищення твердих і рідких аерозолів мають істотний недолік – необхідність відділення вловленого забруднювача від вловлюючої рідини. З цієї причини мокрі способи слід застосовувати тільки за відсутності інших методів очищення, віддаючи перевагу способам з мінімальною витратою рідини.

В основу дії апаратів для очищення аерозольних викидів покладений певний фізичний механізм. У вловлюючих пристроях знаходять застосування наступні способи відділення зважених частинок від повітря (газу): осадження в гравітаційному полі, осадження під дією сил інерції, осадження у відцентровому полі, фільтрування, осадження в електричному полі, мокре очищення і ін.

За основним механізмом відділення частинок аерозолів і носить назву пиловловлюючий апарат.

У пристрої для очищення аерозольних викидів, разом з основним механізмом вловлювання, зазвичай використовуються і інші закономірності. Завдяки цьому загальна і фракційна ефективність апарату досягає більш високого рівня.

Гравітаційне осадження. Частинки аерозолів осідають з потоку забрудненого повітря під дією сили тяжіння. Для цього необхідно створити відповідний режим руху забрудненого повітря в апараті з урахуванням розміру частинок, їх густини і так далі.

Інерційне осадження. Інерційне осадження ґрунтується на тому, що частинки аерозолів і повітря (газ), зважаючи на значну різницю густини володіють різною інерцією. Аерозольні частинки, рухаючись за інерцією, відділяються від газового середовища.

Осадження під дією відцентрової сили. Відбувається при криволінійному русі забрудненого газоповітряного потоку. Під дією виникаючих відцентрових сил аерозольні частинки відкидаються на периферію апарату і осідають.

Ефект зачеплення. Частинки аерозолів, зважені в повітряному (газовому) середовищі, затримуються у вузьких звивистих каналах і порах при проходженні газоповітряного потоку через фільтрувальні матеріали.

Мокре очищення. Змочування поверхні елементів апаратів водою або іншою рідиною сприяє затриманню аерозольних частинок на даній поверхні.

Осадження в електричному полі. Проходячи електричне поле, частинки аерозолів отримують заряд. Рухаючись до електродів протилежного знаку, вони осідають на них.

На практиці вловлювання аерозольних частинок знаходять застосування і інші методи: укрупнення частинок в акустичному полі, термофорез, фотофорез, дія магнітного поля, біологічне очищення.

Пиловловлююче устаткування при всьому його різноманітті може бути класифіковане за рядом ознак: за призначенням, за основним способом дії, за ефективністю, за конструктивними особливостями.

Апарати очищення залежно від розмірів вловлюваних частинок і ефективності їх вловлювання розділені на п'ять класів (табл. 13.5).

Таблиця 13.5

Класифікація пиловловлювачів

Клас апарату	Розміри ефективно вловлюваних частинок, мкм	Ефективність за масою пилу, при групі дисперсності пилу				
		I	II	III	IV	V
I	понад 0,3-0,5	-	-	-	99,9-80	<80
II	понад 2	-	-	99,9-92	92-45	-
III	понад 4	-	99,9-99	99-80	-	-
IV	понад 8	>99,9	99-95	-	-	-
V	понад 20	>99	-	-	-	-

Примітка. Межі ефективності відповідають межах зон класифікації груп пилу.

Часто залежно від коефіцієнта очищення апарати ділять на дві групи: грубого очищення і тонкого знепилення. Проте поняття грубого очищення і тонкого знепилення є відносними залежно від виду виробництва і завдань знепилення.

Устаткування для санітарного очищення газів і повітря від зважених дисперсних частинок підрозділяється на дві категорії: апарати сухого очищення і апарати мокрого очищення.

У свою чергу апарати, що використовують сухі методи очищення, по суті фізичних явищ, що відбуваються в них, підрозділяються на гравітаційні, інерційні, фільтраційні і електричні.

В залежності від способу відділення пилу від повітряного потоку конструюють наступне пиловловлююче обладнання: устаткування для вловлювання пилу сухим способом, при якому відокремлені від повітря частинки пилу осідають на суху поверхню; устаткування для вловлювання пилу мокрим способом, при якому відділення частинок від повітряного потоку здійснюється з використанням рідин.

Пиловловлююче устаткування за принципом дії підрозділяється на групи, за конструктивними особливостями на види і діє за сухим (табл. 13.6) і мокрим (табл. 13.7) способом.

Таблиця 13.6

Групи і види пиловловлюючого устаткування для вловлювання пилу сухим способом

Група устаткування	Вид устаткування	Область застосування	
		повітряних фільтрів	пиловловлювачів
Гравітаційне	Порожнисте	-	+
	Поличне		+
Інерційне	Камерне	-	+
	Жалюзійне	-	+
	Циклонне	-	+
	Ротаційне	-	+
Фільтраційне	Тканинне	-	+
	Волокнисте	+	-
	Зернисте		+
	Сітчасте	+	-
	Губчасте	+	
Електричне	Однорозонне		+
	Двотонне	+	+

Таблиця 13.7

Групи і види пиловловлюючого устаткування для вловлювання пилу мокрим способом

Група устаткування	Вид устаткування	Область застосування	
		повітряних фільтрів	пиловловлювачів
Інерційне	Циклонне	—	+
	Ротаційне	—	+
	Скруберне	—	+
	Ударне	—	+
Фільтраційне	Сітчасте	+	—
	Пінне	—	+
Електричне	Однорозонне	—	+
	Двотонне	+	+
Біологічне	Біофільтр	—	+

Примітка. Знак «+» означає застосування; знак «-» означає незастосування.

Апарати мокрого очищення підрозділяються на інерційні, фільтраційні і електричні.

Найбільш поширеним устаткуванням для вловлювання дисперсних частинок з газоповітряних потоків є: сухі гравітаційні і інерційні вихрові осаджувачі, фільтри різних конструкцій, мокрі пиловловлювачі, електрофільтри.

В цілому система очищення повітря і газів може містити устаткування декількох типів, сполучене в послідовний ланцюжок у міру підвищення ефективності пиловловлювання. Пиловловлююче устаткування, в якому відділення пилу від повітряного потоку здійснюється послідовно в декілька ступенів, що відрізняються за принципом дії, конструктивними особливостями і способом очищення, відносять до комбінованого пиловловлюючого устаткування.

В даний час використовуються різні методи і апарати для вловлювання аерозольних домішок з повітря. На практиці для цього найчастіше застосовують апарати гравітаційні, інерційні сухі і мокрі, такі, що фільтрують в пористому шарі і в електричному полі. До основних представників інерційних сухих пиловловлювачів відносять жалюзійні пристрої, циклони одиночні і групові, мультициклони, а мокрих – промивачі порожнисті і насадочні, пінні, ударно-інерційної дії (струменеві, імпакторні, ротоклони), скрубери Вентурі. Пористі фільтри розрізняють за фільтруючим матеріалом (фільтри з волокнистих – тканих і нетканих, сипких матеріалів, ущільнених металевих і металево-керамічних порошків, металевих і полімерних сіток), а потім – за конструкцією, типорозмірами і окремим ознакам. У електрофільтрів основною роздільною ознакою вважається горизонтальний або вертикальний напрям руху оброблюваного потоку.

Вибір устаткування при формуванні системи пиловловлювання залежить від конкретних вимог виробництва і фізико-хімічних властивостей дисперсних частинок.

В основі оригінальної концепції класифікації сепараторів зважених частинок, яка була запропонована А.І.Пірумовим, лежить принцип розділення пиловловлювачів на класи за розмірами ефективно вловлюваних частинок (табл. 13.8). Така класифікація надає істотну допомогу при виборі засобів пиловловлювання.

Таблиця 13.8

Класифікація пиловловлювачів за розмірами ефективно вловлюваних частинок

Клас сепаратора	I		II			III	IV		V
Мінімальний розмір ефективно вловлюваних частинок, мкм	0,3		2			4	8		20
Група пилу по дисперсності	V	IV	IV	III	III	II	II	I	I
Медіанний діаметр частинок, мкм*	менше 1	1...10	1...10	10...40	10...40	40...120	40...120	понад 120	понад 120
Максимальний ступінь очищення, %	80	80...99	45...92	92...99	80...99	99...99,9	95...99,9	понад 99,9	понад 99

*Примітка. Група пилу і відповідний їй розмір частинок, які можуть бути вловлені з максимальним ступенем очищення в даному класі сепаратора.

У табл. 13.9 приведені характеристики різних пиловловлювачів. Ці відомості значно полегшують вибір відповідного устаткування для систем очищення газоповітряних викидів від зважених частинок.

Таблиця 13.9

Структурні характеристики різних систем пиловловлювання

Показники	Пиловловлювачі					Фільтри	
	гравітаційні	відцентрові		мокрі		тканинні	електричні
		низьконап'ірні	средненапорные	низьконап'ірні	високконап'ірні		
Гідравлічний опір	до 100	100-300	750-1250	750-1500	5000-12500	750-1500	100-400
Характерний параметр	m_T	ω		S_{tk}		при $d_T < 0,3\text{мм}$	K_e

						D ; при $d_T > 0,3\text{мм}$ S_{ik}	
Залежність ефективності уловлювання: від розміру частинок	$f(d_T^2 C_k)$					при $d_T < 0,3\text{мм}$ $f(C_k/d_T)$; при $d_T > 0,3\text{мм}$ $f(d_T^2/C_k)$	$f(d_T C_k)$
від температури	практичне має	$f(C_k/\mu_z)$		практично не визначається		при $d_T < 0,3\text{мм}$ $f(C_k T_z/\mu_z)$; при $d_T > 0,3\text{мм}$ $f(C_k/\mu_z)$	$f(C_k/\mu_z)$
від концентрації	немає	визначається діаметром апарату і властивостями пилу		визначається системою водопостачання і можливими витратами енергії		визначається типом фільтру (зазвичай не більш 20 г/м³)	гранична $c = n_u e \rho_T d_T / 12 \xi_0 E$
від вологості	немає			сприяє зростанню ефективності		немає	сприяє зростанню ефективності
Орієнтовний мінімальний розмір частинок, що вловлюються з високою ефективністю, мкм	50-40	40-30	25-8	5-2	1-0,1	0,1	1,0-0,25
Максимально допустима температура газу, °C	визначається матеріалом, з якого виготовлений апарат					визначається матеріалом перегородки, що фільтрує (<220-250)	визначається складом газу і властивостями пилу
Нижня гранична температура газу	вище за точку роси			будь-яка		вище за точку роси	
Стійкість до корозії	достатньо стійкі			за наявності в газах кислот, лугів потрібний антикорозійний захист		стійкі при температурі, що перевищує точку роси	
Вибухо- і вогнебезпечність	незначна			мінімальна		велика	
Орієнтовна вартість очищення по відношенню до низьконапірних циклонів		1,0-1,5	2,0-3,0	2,5		3,0-7,5	5,0-15,0

Позначення: m_T , d_T – вага, діаметр частинки; ω – центробіжний фактор осадження; $S_{ik} = d_T^2 c_{Tx} / (18 \mu_z)$ – критерій Стокса; D – коефіцієнт дифузії; K_e – коефіцієнт напруженості; c – концентрація пилу; T_z , m_T , x_z , c_z абсолютна температура, динамічна в'язкість, швидкість, густина газу; n_i – концентрація іонів в 1 м^3 ; e – діелектрична стала; E – напруженість електричного поля.

Прості методи обробки викидів сучасних виробничих процесів також швидше за все не забезпечать належного ступеня очищення, що запобігає відчутному збитку навколишньому середовищу. Так, наприклад, прості пиловловлювачі – осаджувальні камери, жалюзійні решітки, циклони можуть бути вдало застосовані в двоступінчатій схемі очищення для попередньої обробки викидів. Проте, слід було б відмовитися від використання мультициклонів як єдиного засобу очищення димових газів парогенераторів електростанцій. Об'єми викидів теплоенергетичних установок сягають 400...500 м/с, і тому проскакування забруднювача в 1...2% може представляти серйозну небезпеку навколишньому середовищу, тоді як мультициклони забезпечують ступінь очищення не більш ніж на 85...90%.

Всі компоненти, що підлягають видаленню, необхідно оцінити за фізико-хімічними і санітарно-гігієнічними властивостями. По аерозольних забруднювачах необхідні зведення про розміри частинок, абразивності, злипаємості, питомому електричному опорі, характері взаємодії з рідинами.

При обробці викидів, що містять тверді аерозольні забруднювачі, низьких величин проскакування (1...2% і менше) можна досягти, як правило, тільки двоступінчатим очищенням. Для попереднього очищення можуть бути застосовані жалюзійні решітки і циклонні апарати (іноді для невеликих викидів – пилоосаджувальні камери), а для остаточної – пористі фільтри, електрофільтри або мокрі пилоосаджувачі.

Рідкі аерозолі (тумани) можуть бути скоагульовані за допомогою зміни параметрів стану (охолодження і підвищення тиску) з метою осадження в подальшому з використанням, як правило, мокрих способів вловлювання в мокрих скруберах, пористих і електричних фільтрах, в абсорберах.

Якщо тверді або рідкі аерозолі по елементному складу не містять інших елементів, окрім вуглецю, водню і кисню (пил рослинного походження, шерстяні волокна, тумани мінеральних масел і ін.), то вони можуть бути знешкоджені в одну стадію – безпосереднім спалюванням в топках котлів і печей.

13.3. Основні характеристики апаратів для очистки аерозолів

До основних характеристик устаткування для очищення аерозолів від зважених частинок відносяться ефективність (ступінь) очищення повітря від пилу, який також іноді називають коефіцієнтом корисної дії апарату, хоча це не відображає його фізичний сенс; гідравлічний опір; вартість очищення. До загальних параметрів пиловловлювачів відносять їх продуктивність по газу, що очищається, і енергоємність, яка визначається величиною витрат енергії на очищення 1000 м³ газу.

При оцінці ефективності роботи пиловловлювачів беруть до уваги:

- загальну ефективність знепилювання, або кількість пилу, затриманого в пиловловлювачі, по відношенню до кількості пилу, який міститься в газі, що знепилюється;
- фракційну ефективність, що визначає повноту вловлювання частинок певних розмірів; її виражають відсотком відокремлених в пиловловлювачі частинок пилу певних розмірів;
- залишковий вміст пилу в газі при виході його з пиловловлювача;
- розподіл залишку пилу в газі за розміром частинок або швидкості витання.

Крім того, істотним чинником для оцінки ефективності пиловловлювачів є витрата споживаної енергії, а при підборі того або іншого типу пиловловлювача – частота розподілу дисперсності фракцій.

Основним показником, що характеризує роботу апаратів очищення повітря від пилу в тих або інших конкретних випадках їх застосування, є коефіцієнт (ступінь) очищення (ефективність знепилювання) %:

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{вл}}}{M_{\text{вх}}} \cdot 100\% = \frac{M_{\text{вх}} - M_{\text{вих}}}{M_{\text{вх}}} \cdot 100\% = \frac{M_{\text{вл}}}{M_{\text{вл}} + M_{\text{вих}}} \cdot 100\%,$$

де $M_{\text{вх}}$, $M_{\text{вл}}$ і $M_{\text{вих}}$ – маса частинок пилу, що містяться в газах відповідно на вході в апарат (тобто до очищення), вловлених в апараті і на виході з апарату після

очищення.

При експлуатації окремих видів пиловловлюючих апаратів (ПВА) можливий дисбаланс по газу. В цьому випадку витрати газу перераховують на стаціонарні умови ($t=20^{\circ}\text{C}$, $P=101$ кПа або 760 мм рт. ст.), а коефіцієнт очищення визначається за формулою (%):

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{вх}} \cdot V_{\text{вх}} - C_{\text{вих}} \cdot V_{\text{вих}}}{C_{\text{вх}} \cdot V_{\text{вх}}} \cdot 100\%,$$

де $C_{\text{вх}}$ і $C_{\text{вих}}$ – середні концентрації частинок в газах відповідно на вході в апарат і на виході з нього (відповідно мг/м^3); $V_{\text{вх}}$ і $V_{\text{вих}}$ – об'ємна витрата газів, що поступають в апарат і виходять. Загальний коефіцієнт очищення залежить від умов експлуатації ПВА і недостатньо повно відображає рівень його досконалості при роботі на пилі різної дисперсності. Ступінь досконалості ПВА характеризує досягаємі з його допомогою фракційний і парціальний коефіцієнти очищення.

Якщо об'ємні витрати газу до і після апарату рівні, то вираз прийме поширений вигляд (%):

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{C_{\text{вих}}}{C_{\text{вх}}}\right) \cdot 100\%.$$

Якщо не відбувається підсосу повітря в апараті, ефективність очищення визначають за формулою:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{M_{\text{вих}}}{M_{\text{вх}}}\right) \cdot 100\%.$$

За наявності підсосу повітря (наприклад, в рукавних фільтрах) ефективність визначають за формулою:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{M_{\text{вих}} \cdot V_{\text{вих}}}{M_{\text{вх}} \cdot V_{\text{вх}}}\right) \cdot 100\%.$$

Для повної характеристики апарату потрібно знати його фракційну ефективність. Вона показує частку вловленого пилу по кожній фракції. Це дозволяє вибрати пиловловлююче устаткування відповідно до фракційного складу пилу. Фракційна ефективність очищення виражається відношенням:

$$\varepsilon_{\text{ф}} = \frac{m_{\text{ф.в.}}}{M_{\text{ф.н.}}},$$

де $m_{\text{ф.в.}}$ – кількість вловленого пилу фракції; $M_{\text{ф.н.}}$ – кількість пилу фракції, що надійшла в апарат.

Фракційний коефіцієнт рівний відношенню кількості пилу даної фракції, вловленої в апараті $M_{\text{ф.вл.}}$, до кількості вхідного пилу тієї ж фракції $M_{\text{ф.вх}}$ (%):

$$\varepsilon_{\text{ф}} = \frac{M_{\text{ф.вл.}}}{M_{\text{ф.вх}}} \cdot 100\% = \frac{\varphi_{\text{вл.}} \cdot M_{\text{вл.}}}{\varphi_{\text{вх}} \cdot M_{\text{вх}}} \cdot 100\% = \varepsilon \cdot \frac{\varphi_{\text{вл.}}}{\varphi_{\text{вх}}},$$

де φ – частка маси пилу даної фракції в загальній кількості пилу в повітрі.

Загальну ефективність апарату ε визначають по фракційній ефективності таким чином:

$$\varepsilon_{\text{ф}} = \frac{M_{\text{ф1}} \cdot \varepsilon_{\text{ф1}} + M_{\text{ф2}} \cdot \varepsilon_{\text{ф2}} + \dots + M_{\text{фn}} \cdot \varepsilon_{\text{фn}}}{M_{\text{ф1}} + M_{\text{ф2}} + \dots + M_{\text{фn}}},$$

де $M_{\text{ф1}}$, $M_{\text{ф2}}$..., $M_{\text{фn}}$ – маса пилу відповідних фракцій, що надійшла в апарат; $\varepsilon_{\text{ф1}}$, $\varepsilon_{\text{ф2}}$, $\varepsilon_{\text{фn}}$ – фракційна ефективність вловлювання по даній фракції.

Відношення кількості пилу даної фракції до всього пилу, що надійшов в апарат M , виражається:

$$\frac{M_{\phi 1}}{M} = \delta_1; \frac{M_{\phi 2}}{M} = \delta_2; \dots \frac{M_{\phi n}}{M} = \delta_n.$$

Після перетворення отримаємо значення загальної ефективності очищення

$$\varepsilon = \delta_1 \cdot \varepsilon_{\phi 1} + \delta_2 \cdot \varepsilon_{\phi 2} + \dots + \delta_n \cdot \varepsilon_{\phi n}$$

або у відсотках

$$\varepsilon = 100\% \sum_{i=1}^n \delta_i \cdot \varepsilon_{\phi i}.$$

Парціальний коефіцієнт очищення використовується рідше і рівний відношенню кількості частинок даного розміру, вловлених в апараті $M_{n.вл}$, до кількості частинок даного розміру на вході в апарат $M_{n.вх}$ (%):

$$\varepsilon_n = \frac{M_{n.вл}}{M_{n.вх}} \cdot 100\% = \frac{\eta_{n.вл} \cdot M_{вл}}{\eta_{n.вх} \cdot M_{вх}} \cdot 100\% = \varepsilon \cdot \frac{\eta_{n.вл}}{\eta_{n.вх}},$$

де η_n – частка частинок даного розміру.

Зазвичай ε_{ϕ} і ε_n для ПВА визначають експериментально, шляхом проведення відповідних випробувань апаратів.

При послідовній установці декількох апаратів (каскадна, або багатоступінчате очищення), яке використовують для повнішого знепилювання повітря, сумарна ефективність очищення визначається за формулою:

$$\varepsilon = [1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot \dots \cdot (1 - \varepsilon_n)] \cdot 100\%,$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \dots \varepsilon_n$ – ефективність очищення кожного з апаратів, що входять в каскад (у долях одиниці).

Ефективність очищення – найважливіша характеристика апарату. На неї орієнтуються при виборі пиловловлюючого устаткування відповідно до допустимого залишкового вмісту пилу в повітрі, що очищається.

Порівнюючи два апарати, зіставляють відсотки пропущеного пилу. Якщо ефективність одного апарату 99%, а іншого 98%, то вони пропускають відповідно 1% і 2% пилу. Отже, ефективність першого апарату в два рази вища, ніж другого.

Продуктивність характеризується кількістю повітря, яка очищається за 1 годину. Апарати, в яких повітря очищається при проходженні через фільтруючий шар характеризуються питомим повітряним навантаженням, тобто кількістю повітря, яка проходить через 1 м² фільтруючої поверхні за 1 годину.

Гідравлічний опір має важливе значення, оскільки від його величини залежить необхідний тиск вентилятора, а отже, і витрата електроенергії. Гідравлічний опір апарату визначають за формулою:

$$H = A \cdot v^n,$$

де v – швидкість руху повітря через апарат, м/с; A, n – коефіцієнти, які визначаються експериментальним шляхом і залежать від конструкції апарату.

Витрата енергії залежить значною мірою від гідравлічного опору апарату. У електрофільтрах електроенергія витрачається в основному на створення електростатичного поля. Витрата електроенергії при одноступінчатому очищенні знаходиться в межах від 0,035 до 1,0 кВт-год на 1000 м³ повітря. Питомі витрати енергії на видалення дисперсних домішок зростають пропорційно зниженню концентрації зважених в потоці частинок, оскільки ступінь очищення в

пиловловлюючих апаратах практично не залежить від початкової концентрації забруднювача. На додаток до цього витрати ростуть і зі зменшенням розмірів частинок.

Останніми роками як один з показників роботи апаратів очищення почали використовувати енергетичні витрати на конкретний процес різними способами знепилювання. Як показник енергетичного балансу по аналогії з коефіцієнтом корисної дії використовують так званий енергетичний ККД:

$$\varepsilon^E = \frac{E_k}{E_z},$$

де E_k – корисно використовувана енергія; E_z – вся енергія, витрачена в процесі знепилювання.

Енергетичний коефіцієнт не враховує термодинамічні втрати, пов'язані, наприклад, з неізобарністю реального теплового процесу, супутнього процесу знепилювання. Тому оцінку систем знепилювання по енергетичному ККД не можна вважати завжди обгрунтованою. Такий підхід справедливий для оборотних термодинамічних процесів.

Вартість очищення є найважливішим показником, оскільки характеризує економічність очищення. Вона залежить від багатьох чинників: капітальних витрат на устаткування, експлуатаційних витрат і ін.

Вартість очищення повітря в різних апаратах значно відрізняється. Як правило, ефективніше очищення обходиться значно дорожче. Якщо вартість очищення певної кількості повітря в такому порівняно простому апараті, як циклон великої продуктивності, прийняти за 100%, то вартість очищення такої ж кількості повітря в батарейному циклоні складе 120%, в циклоні з водяною плівкою – 130%, в скрубєрі ВТІ – 140 %, у електрофільтрі – 220%, в тканинних фільтрах (залежно від типу) від 260 до 280%. Двоступінчате очищення по схемі батарейний циклон - електрофільтр коштує 330%.

Розділ 14

Механічне пиловловлювання

Термін “механічні осаджувачі” зазвичай використовують для позначення пристроїв, в яких частинки осідають під дією або сил тяжіння або інерції, або і тих і інших. У гравітаційних осаджувачах частинки осідають з потоку газу під дією власної ваги. У інерційних осаджувачах потік частинок, зважених в газі, раптово піддається зміні напрямку руху. Виникаючі інерційні сили прагнуть викинути частинки з потоку. Циклони-осаджувачі, в яких використовується інерція відцентрової сили, є окремим випадком інерційних осаджувачів.

Швидкість видалення частинок пропорційна силі осадження. Через досить невеликі маси дрібних частинок гравітаційне осадження виявляється дуже повільним і малоефективним процесом для частинок розміром менше 100 мкм. При використанні інерційного ефекту швидкість вловлювання різко підвищується. Завдяки цьому можна зменшити розмір устаткування і розширити діапазон ефективного вловлювання до частинок розміром близько 20 мкм. Для деяких циклонів граничний розмір вловлюваних частинок складає 5...10 мкм.

Для осадження під дією гравітації газ зазвичай просто поволі пропускають через велику камеру, причому частинки мають можливість осісти в бункер на дні. Відстань, необхідну для осадження частинок, можна зменшити шляхом розділення простору камери декількома горизонтальними паралельними піддонами.

У гравітаційних камерах можна встановлювати перегородки для зміни напрямку руху газу і залучення сил інерції для збільшення осаджувальної дії. У інших конструкціях для створення інерційного ефекту використовують заслонки, відбійники.

У циклонних осаджувачах газу суміщають обертальний або вихровий рух, щоб піддати частинки дії відцентрової сили. Це досягається або тангенціальним введенням потоку в круглу камеру, або пропусканням газу мимо лопастей, радіально орієнтованих по відношенню до осі потоку.

Пристрої всіх цих типів характеризуються простотою конструкції і роботи. Вони відносно дешеві в порівнянні з іншими типами осаджувачів. Загалом вони не мають рухомих частин, а для забезпечення робочих умов можна використовувати будь-який матеріал. Витрати енергії на роботу також відносно малі, що обумовлено невеликим перепадом тиску при проходженні газу через пристрій.

Осаджувачі даного типу використовуються для первинного видалення грубих частинок газового потоку. В більшості випадків захисту повітря від забруднення вимагається вловлювання набагато дрібніших частинок (розміром близько 1 мкм), тому зазвичай необхідно застосовувати осаджувачі інших типів. Проте механічні осаджувачі можна використовувати як попередні, розташовуючи їх послідовно з пристроями інших типів, щоб зменшити навантаження на останні. Це особливо необхідно при сильному запиленні газового потоку. Механічні осаджувачі можуть працювати довгий час без обслуговування з малими енергетичними витратами.

14.1. Пилоосаджувальні камери

Найпростішим сепаратором твердих зважених частинок є пилоосаджувальна камера, в якій запилений газовий потік переміщається з малою швидкістю, що робить можливим гравітаційне осадження (седиментацію) суспензії, що транспортується.

Для досягнення прийнятної ефективності очищення газів даними пристроями необхідно, щоб частинки знаходилися в пилоосаджувальних апаратах якомога триваліший час, а швидкість руху пилового потоку була незначною. Тому дане устаткування відноситься до категорії екстенсивного устаткування, робочі об'єми таких апаратів досить значні, що вимагає великих виробничих площ. Проте пилоосаджувальні камери і пилові мішки володіють дуже незначним гідравлічним опором (50...300 Па).

У промисловості пилоосаджувальні камери використовуються як пристрої попередньої обробки газів, наприклад, для відділення крупних частинок і розвантаження апаратів подальших ступенів. В зв'язку з цим дане устаткування використовують тільки на перших ступенях систем газоочистки для осадження частинок крупних розмірів (більше 100 мкм). Зазвичай середня витратна швидкість руху газів в пилоосаджувальних камерах складає 0,2...1 м/с, а в пилових мішках – 1...1,5 м/с.

На рис. 14.1 представлені найбільш поширені конструкції пилоосаджувальних камер і пилових “мішків”.

Для рівномірного газорозподілу по перетину в пилоосаджувальних камерах встановлюють дифузори і газорозподільні решітками, а для зниження висоти осадження частинок – горизонтальні або похилі полиці. Ефективність вловлювання частинок за допомогою гравітаційного осадження можна підвищити, зменшуючи необхідний шлях їх падіння. Це можна здійснити, поміщаючи в камеру горизонтальні пластини, що перетворює її на групу невеликих паралельних камер. У деяких конструкціях пилоосаджувальних камер для підвищення їх ефективності передбачається пристрій ланцюгових або дротяних завіс і перегородок, що відхиляються. Це дозволяє додатково до гравітаційного ефекту використовувати ефект інерційного осадження частинок при обтіканні потоком газів різних перешкод.

Дія сили тяжіння може бути збільшено інерційними силами, якщо до стелі камери прикріпити вертикальний екран. При обтіканні газовим потоком нижньої кромки екрану частинки захоплюватимуться вниз інерційною силою, що виникає при викривленні ліній струмини газу.

Метою розрахунку пилоосаджувальних камер є підбір їх габаритних розмірів і визначення коефіцієнта очищення. В загальному випадку коефіцієнти очищення можуть бути знайдені дослідним шляхом, оскільки процес седиментації супроводжується турбулентною дифузією. Особливо помітно впливає турбулентність на погіршення осідання частинок в камерах з розсікачами, а також в порожнистих осаджувальних ємкостях великої висоти.

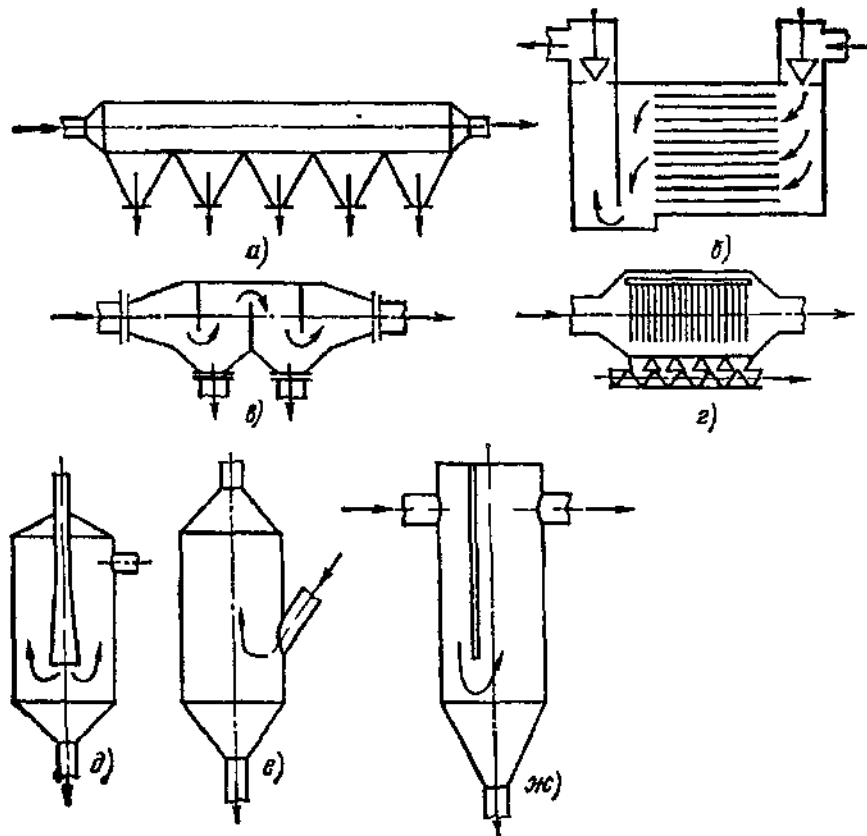


Рис. 14.1. Пилоосаджувальні камери і прості пилоосаджувачі інерційної дії: *а* – проста пилоосаджувальна камера; *б* – багатополочна камера; *в* – камера з перегородками; *г* – камера з ланцюговими або дротяними завісами; *д* – пиловий “мішок” з центральним підведенням газу; *е* – пиловий “мішок” з боковим підведенням газу; *ж* – пилоосаджувач з відбивною перегородкою.

Конструювання осаджувальних камер базується на підрахунку сил, що діють на частинку, і швидкості вертикального руху вниз під дією результуючої сили. Відповідно до закону Ньютона чисте прискорення вертикального руху частинок визначається результуючою дією сили тяжіння, плавучості і опору середовища. У випадку газів ефектом плавучості можна нехтувати. Силу опору виражають через коефіцієнт опору ζ , який залежить від числа Рейнольдса Re для руху частинки:

$$m \frac{d \cdot w_{oc}}{d \cdot t} = gm - \zeta \frac{\rho_c \cdot w_{oc}^2}{2} \pi \cdot r_q^2, \quad (14.1)$$

де $\zeta = \zeta(Re) = \zeta\left(\frac{\rho_c \cdot w_{oc} \cdot d_q}{\mu}\right)$; m – маса частинки; w_{oc} – швидкість руху частинки; t – час; g – прискорення сили тяжіння; ρ_c – густина середовища (газу); r_q – радіус частинки.

Функціональну залежність між ζ і Re беруть із стандартних графіків або рівнянь, що описують рух індивідуальної сферичної частинки. При $Re < 0,5$ ця залежність характеризується законом Стоксу $\zeta = 24/Re$. Для вищих значень Re можна використовувати емпіричне рівняння Клячко:

$$\zeta = 24/Re + 4/Re^{1/2},$$

яке застосовне в діапазоні $0,5 < Re < 800$. Для маленьких частинок у вираз для сили опору слід вводити поправку Канінгема на ковзання, але в цьому випадку гравітаційне осадження вже не має значення.

З рівняння (14.1) зрозуміло, що вертикальне прискорення частинки продовжується до тих пір, поки сила ваги не стане рівній силі опору; після цього частинка рухається з постійною швидкістю. Ця швидкість називається стаціонарною швидкістю осадження частинки. Час, який необхідний для досягнення цієї швидкості, дуже незначний. Стаціонарна швидкість може бути знайдена прирівнюванням лівої частини рівняння (14.1) до нуля, заміною m на $(\rho_q - \rho_c)d_q^3/6$ і вираженні в безрозмірній формі:

$$4 \cdot g \cdot d_q^3 \cdot \rho_c \cdot (\rho_q - \rho_c) / 3 \cdot \mu^2 = \zeta \cdot Re^2 = 0.$$

Цей вираз визначає число Галілея

$$Ga = 4 \cdot g \cdot d_q^3 \cdot \rho_c \cdot (\rho_q - \rho_c) / 3 \cdot \mu^2.$$

Це число пропорційне d_q^3 і незалежне від w_{oc} . Умовою досягнення стаціонарної швидкості є $Ga = \zeta \cdot Re^2$.

Можна визначити інше безрозмірне число, яке пропорційне $(w_{oc})^3$ і незалежне від d_q :

$$\frac{Re}{\zeta} = \frac{Re^2}{Ga} = \frac{3\rho_c^2 w_{oc}^3}{4g(\rho_q - \rho_c)\mu}.$$

Пряме співвідношення між d_q і w_{oc} можна дати через комбінацію $(Re/\zeta)^{1/3}$ в функції $Ga^{1/3}$. Ця залежність добре виражається емпіричним співвідношенням:

$$\lg(Re/\zeta)^{1/3} = -1,387 + 2,153 \lg Ga^{1/3} + 0,548 \lg^2 Ga^{1/3} + 0,05665 \lg^3 Ga^{1/3}. \quad (14.2)$$

Таким чином, щоб розрахувати стаціонарну швидкість осадження для частинок будь-якого розміру d_q спочатку треба знайти критерій Ga , як описано вище. Потім за рівнянням (14.2) розраховують Re/ζ , а потім отримують w_{oc} , використовуючи зазначене вище визначення Re/ζ .

У діапазоні застосовності закону Стоксу швидкість знаходиться просто:

$$w_{oc} = \frac{g(\rho_q - \rho_c)d_q^2}{18\mu}. \quad (14.3)$$

Співвідношення між розміром частинки і стаціонарною швидкістю осадження показано на рис. 14.2.

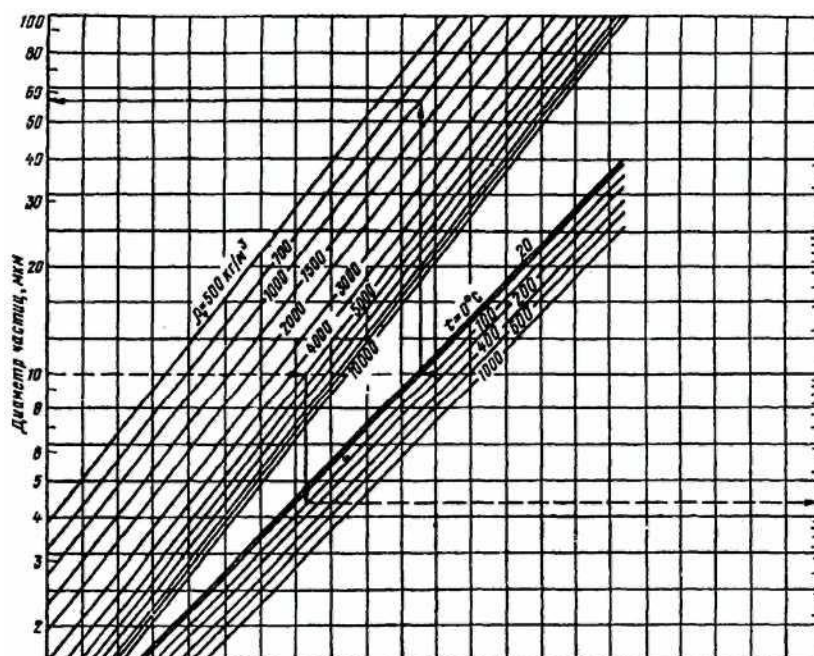


Рис. 14.2. Швидкість осадження у функції розміру частинок

Проста модель проектування осаджувальної камери базується на основі припущення про фронтальний характер перебігу газу через камеру і рівномірне розташування частинок в газі. На рис. 14.3 схематично показаний перетин камери. Частинка, що входить в камеру з швидкістю, рівній швидкості газу v_0 на рівні h_c має рухатись по прямолінійній траєкторії. Осяде чи ні дана частинка, визначається з умови $w_{oc}h_c < v_0 \cdot l$. Осаджена фракція частинок з однією і тією ж швидкістю седиментації w_{oc} визначається співвідношенням $h_c/H = v_0 \cdot l / w_{oc}$.

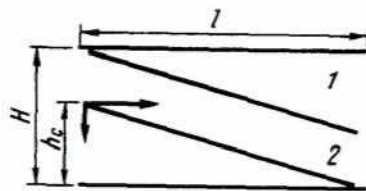


Рис. 14.3. Схема осадження частинок в камері: 1 — очищена зона; 2 — гранична траєкторія

Розміри камери (H , L , B) визначаються розміром d_c найменших частинок, які повинні бути обложіні повністю. Розраховуємо w_{oc} , приймаємо $h_c/H = 1$, знаходимо $L = w_{oc}/v$. Значення v має бути менше швидкості, при якій починається винесення частинок, або менше 3,05 м/с, залежно від того, які з цих значень нижчі. Нарешті, знаходимо добуток $B \cdot H = Q_s/v$, що дозволяє вибрати висоту і ширину.

Габаритні розміри камери, необхідні для гравітаційного осадження частинок більше заданого розміру частинок d_c , зазвичай визначаються за співвідношенням:

$$L = H \frac{v}{w_{oc}}, \quad (14.4)$$

де L — довжина камери, H — висота камери.

Швидкість руху газів в камері v зазвичай призначається в межах 0,2...0,8 м/с, а швидкість витання частинок з розміром d_c може бути розрахована із залежності (14.3) або за графіком 14.2. Висота і ширина пилоосаджувальної камери приймаються з конструктивних міркувань, виходячи з граничної швидкості руху газів в камері.

Слід враховувати, що при русі запилених газів в камері турбулентність потоку порушує нормальне гравітаційне осадження, особливо частинок малих розмірів, і дійсний ступінь очищення газів виявляється нижчим, ніж визначений з рівняння (14.4).

Ефективність пилоосаджувача можна розрахувати з використанням співвідношення фракційної ефективності, що дає залежність ефективності вловлювання від розміру частинок. У поєднанні з даними про розподіл частинок, що поступають в пилоосаджувач, по розмірах фракційна ефективність дозволяє визначити загальну ефективність вловлювання.

Для пилоосаджувальних камер з $L/H > 3$ значення парціальних коефіцієнтів очищення (η %) може бути знайдене з достатнім ступенем точності на підставі розрахунків середньої концентрації частинок відповідного розміру у вихідному перетині пилоосаджувальної камери за формулою (%):

$$\varepsilon_n = 100 \cdot \left(1 - \frac{1}{i} \sum_0^i N_i \right), \quad (14.5)$$

де i – число крапок, для яких розраховується концентрація частинок; N_i – відношення концентрації частинок даного розміру в розрахунковій точці вихідного перетину камери до їх концентрації у вхідному перетині. Концентрація цих частинок у вхідному перетині приймається рівномірно розподіленою по перетину. Передбачається, що розподіл частинок по розмірах підкоряється нормальному закону розподілу, значення величини N визначається з рівняння:

$$N = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1. \quad (14.6)$$

Значення функцій $\Phi(x_1)$ і $\Phi(x_2)$ визначаються з таблиці нормальної функції розподілу (табл. 14.1).

Величини x_1 і x_2 , у свою чергу, визначаються з виразів:

$$x_1 = \frac{H + h - L \cdot \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{2D_t - \frac{L}{v}}}; \quad (14.7)$$

$$x_2 = \frac{H - h + L \cdot \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{2D_t - \frac{L}{v}}}; \quad (14.8)$$

де h – відстань від стелі камери; D_t – коефіцієнт турбулентної дифузії частинок.

При виконанні умови $w_{oc} < Lg/v$, що характерно для більшості випадків осадження в камерах, коефіцієнт турбулентної дифузії частинок співпадає з коефіцієнтом турбулентної дифузії газового потоку і може бути розрахований за формулою Шервуда-Вертца:

$$D_t = 0,02 \cdot v \cdot H \cdot \sqrt{\lambda}, \quad (14.9)$$

де λ – коефіцієнт тертя потоку, може бути прийнятий рівним 0,03.

Тоді вирази (14.7) і (14.8) значно спрощуються і приймають вигляд:

$$x_1 = \frac{1 + \frac{h}{H} - \frac{L}{H} \cdot \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \frac{L}{H}}}, \quad (14.10)$$

$$x_2 = \frac{1 - \frac{h}{H} + \frac{L}{H} \cdot \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \frac{L}{H}}}, \quad (14.11)$$

$$\left(\frac{w_{oc}}{v} \right)_{50} \approx 1,5 \cdot \frac{H}{L}. \quad (14.12)$$

Додаткові значення w_{oc}/v , необхідні для визначення декількох точок залежності $\varepsilon_n = f(d_q)$, приймаються вищі і нижчі значення $(w_{oc}/v)_{50}$. Повний коефіцієнт очищення і ступінь очищення визначаються з рівняння:

$$\varepsilon = \sum \varepsilon_n \frac{N_{ex}}{100} \Delta d_q, \quad (4.13)$$

де ε – густина розподілу %/мкм; Δd_q – різниця граничних розмірів обираемого діапазону частинок з гістограми, мкм.

Таблиця 14.1.

Значення нормальної функції розподілу

X	Φ(x)	X	Φ(x)	X	Φ(x)	X	Φ(*)
-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	0,9279
-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
-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
-1,28	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

Слід мати на увазі, що $\sum N_{ex} \Delta d_i$ має бути рівне 100%.

Розрахунок пилоосаджувальних камер виконують в наступному порядку.

1. Визначають швидкість газового потоку в робочому перетині камери:

$$v = \frac{V}{H \cdot B}, \quad (14.14)$$

де V – витрата газів, м/с; H, B – висота і ширина камери відповідно, м.

Чим менша швидкість потоку, тим вища ступінь очищення, але і більш громіздкішою вийде камера. Бажано, щоб швидкість потоку не перевищувала 0,8...1 м/с, проте для компактних частинок великої густини її можна доводити до 2...3 м/с.

2. Приймають за конструктивними міркуваннями співвідношення довжини і висоти камери L/H . Для конструкцій з $L/H < 3$ дана методика розрахунку не дає необхідної точності.

3. Приймають, що відношення швидкості витання частинок w_{oc} , які будуть вловлені в камері на 50%, до швидкості газового потоку приблизно відповідає півтора значенням $\left(\frac{w_{oc}}{v}\right)_{50} \approx 1,5 \cdot \frac{H}{L}$ і знаходять з цього співвідношення величину w_{oc} .

4. Діаметр частинок, що осідають в камері на 50%, знаходять з припущення, що осідання відбувається відповідно до закону Стокса за формулою:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot w_{oc}}{g \cdot (\rho_q - \rho_c)}}, \text{ м} \quad (14.15)$$

Для нагрітих газів може бути використана формула:

$$d_{50} = 1,614 \cdot 10^{-3} (273 + t)^{0,75} \left[\frac{w_{oc}}{\rho_q \cdot (384 + t)} \right]^{0,5}, \text{ м}. \quad (4.16)$$

5. Вибирають декілька співвідношень w_{oc}/v , вищих і нижчих прийнятого і визначають відповідні значення d_q .

6. Визначають середню концентрацію частинок на виході з камери для кожного прийнятого співвідношення w_{oc}/v або, що те ж саме, для кожного прийнятого значення d_q таким чином:

а) призначають “ k ” крапок по висоті перетину, задаючись величиною h/H , де h – відстань від стелі камери до даної крапки;

б) розраховують так звані параметри очищення x_1 і x_2 (параметри функції парціального розподілу $\Phi(x)$) за формулами:

$$x_1 = \frac{1 + \frac{h}{H} - \frac{L}{H} \cdot \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \frac{L}{H}}}; \quad (4.17)$$

$$x_2 = \frac{1 - \frac{h}{H} + \frac{L}{H} \cdot \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \frac{L}{H}}}; \quad (4.18)$$

в) за значеннями x_1 і x_2 з таблиці 14.1 знаходять інтеграли вірогідності $\Phi(x_1)$ і $\Phi(x_2)$ і підраховують значення N_i .

$$N_i = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 100; \quad (4.19)$$

г) усереднюють значення N по перетину, обчислюючи його як середнє арифметичне по висоті перетину:

$$N_{cp} = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{k};$$

д) визначають середній парціальний коефіцієнт осадження частинок даного розміру (з прийнятою швидкістю осадження-витання):

$$\varepsilon_{n,cp} = 100 - N_{cp}. \quad (4.21)$$

7. Знаходять повний коефіцієнт очищення η як суму похідних долей частинок відповідних фракцій на їх фракційні (парціальні) коефіцієнти очищення за формулою:

$$\varepsilon = \sum \varepsilon_n \frac{N_{ex}}{100} \Delta d_q.$$

14.2. Циклонні осаджувачі

Найбільшого поширення в системах пилоочистки набули циклони. Циклони широко застосовуються для очищення від пилу вентиляційних і технологічних викидів у всіх галузях народного господарства.

На практиці система вловлювання частинок створюється шляхом додання запиленому потоку закрученого або обертального руху, обмеженого циліндричними стінками. Частинки осідають при відкиданні на стінки. Такий пристрій називається циклоном.

Ефективність циклонів можна пояснити на наступному прикладі. Частинка масою m що рухається по круговій траєкторії радіусу r з тангенціальною швидкістю u_T , схильна до дії відцентрової сили $m u_T^2 / r$. Для типових умов $u_T = 15$ м/с, $r = 0,6$ м ця сила приблизно в 39 разів перевищує силу тяжіння. Тому вказана сила може різко збільшити осадження в камері.

Циклони прості у виготовленні, надійні в експлуатації при високому тиску і температурах, забезпечують фракційну ефективність очищення на рівні 80...95% від частинок пилу розміром більше 10 мкм. Циклони в основному рекомендуються використовувати перед високоефективними апаратами пилоочистки (тканинними і електрофільтрами). В ряді випадків циклони забезпечують ефективність очищення, достатню для викиду газів або повітря в атмосферу.

В Україні для циклонів прийнятий стандартизований ряд внутрішніх діаметрів D : 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400 і 3000 мм. Для всіх одиночних циклонів бункери виконуються циліндричними з конічним днищем. Діаметр бункера приймають $1,5 \cdot D$ для циліндричних і $1,1 \dots 1,2 \cdot D$ для конічних циклонів. Висота циліндричної частини бункера приймається $0,8 \cdot D$, кут конусності стінок днища – 60° .

Циклони діляться на циклони великої продуктивності і циклони високої ефективності. Перші мають зазвичай великий діаметр і забезпечують очищення значних кількостей повітря. Другі – порівняно невеликого діаметру (до 500...600 мм). Дуже часто застосовують групове встановлення цих циклонів, сполучених паралельно по повітрю.

Ефективність очищення газу в циклонах в основному визначається дисперсним складом і густиною частинок вловлюваного пилу, а також в'язкістю газу, залежною від його температури. При зменшенні діаметру циклону і підвищенні до певної межі швидкості газу в циклоні ефективність очищення зростає. Тому діаметри циклонів, що серійно випускаються, не перевищують 5 м.

Циклони, як правило, використовують для грубого і середнього очищення повітря від сухого пилу, що не злипається. Прийнято вважати, що вони володіють порівняно невеликою фракційною ефективністю в області фракцій пилу розміром до 5...10 мкм, що є основним їх недоліком. Проте циклони, особливо циклони високої ефективності, вловлюють значну частину пилу розміром до 10 мкм – до 80 і більше відсотків.

В сучасних високоефективних циклонах, в конструкції яких враховані особливості вловлюваного пилу, вдалося істотно підвищити загальну і фракційну ефективність очищення. Відмічений вище недолік обумовлений особливостями роботи циклонів, зокрема, турбулізацією потоку запиленого повітря, яка перешкоджає сепарації пилу.

Розроблено і застосовується в техніці знепилювання велике число різних типів циклонів, які відрізняються один від одного формою, співвідношенням розмірів елементів і так далі (рис. 14.4).

Конструктивно циклони можуть бути виконані одиночними, груповими і батарейними. Серед одиночних і групових циклонів найбільшого поширення набули циклони НДЮГази типів ЦН-15 і СК-ЦН продуктивністю 600...230000 м³/год, а серед батарейних циклонів – типів БЦ-2, ПБЦ, ЦБ-254Р, ЦБ-150У продуктивністю від 12000 до 480000 м³/год. Ефективність очищення в батарейних циклонах вища, ніж в одиночних або групових, оскільки в них циклонні елементи мають значно менший діаметр при рівній продуктивності.

Запилене повітря поступає в циклон через патрубок, очищений, – видаляється через вихлопну трубу. Залежно від способу підведення повітря до циклону розрізняють циклони з тангенціальним і спіральним підведенням повітря. За інших рівних умов циклони із спіральним підведенням володіють вищою ефективністю очищення. Потік запиленого повітря входить в корпус циклону зазвичай із швидкістю 14...20 м/с.

Застосовують циклони праві (обертання потоку запиленого повітря за годинниковою стрілкою, якщо дивитися зверху) і ліві (обертання проти годинникової стрілки).

Швидкість газу у вільному перетині циліндричної частини циклонів повинна лежати в межах 2,5...3,5 м/с. У звичайних умовах оптимальною вважається швидкість 3,5 м/с, а швидкість 2,5 м/с рекомендується приймати при роботі з абразивним пилом.

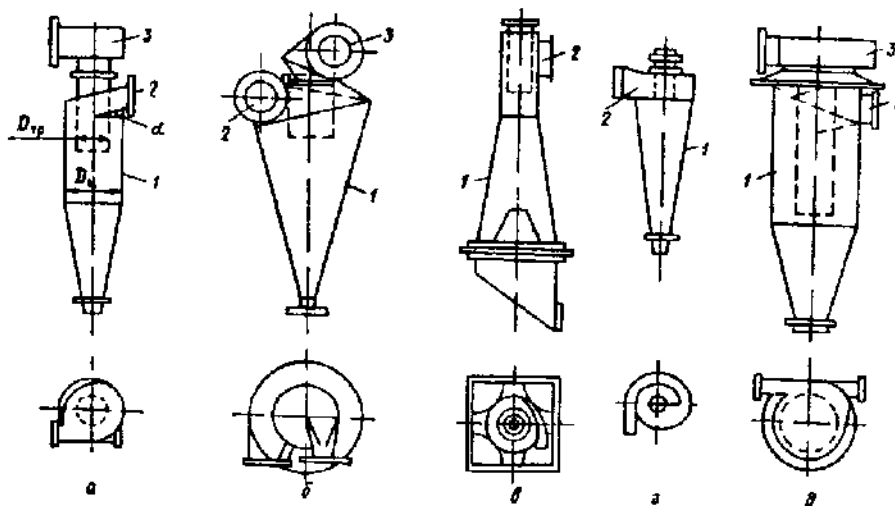


Рис. 14.4. Основні типи конструкцій циклонів: *а* – циклон НДІОГазу; *б* – СІОП; *в* – ВЦНІОП; *г* – СК-ЦН-34; *д* – ЛІОТ; 1 – корпус; 2 – вхідний патрубок; 3 – равликоподібний випускний патрубок

Запилені гази подаються в циклони через тангенціальні або аксіальні завихорювачі і здійснюють всередині апаратів складний обертально-поступальний рух, характеристики якого вивчені ще недостатньо. На частинки, зважені в потоці всередині циклону, діє сила інерції, яка прагне змістити їх з криволінійних ліній струму по дотичним, направленим під деяким кутом вниз і до стінки корпусу. Частинки, що дотикаються до внутрішньої поверхні стінки, під дією сил тяжіння, інерції і газового потоку, що опускається, ковзають вниз і потрапляють в пилоприймач (бункер). Частинки, що не досягли стінки, продовжують рух по криволінійних лініях струмини і можуть бути винесені з циклону газовим потоком, який може захопити і деяку кількість частинок, що осіли в бункер.

Вважаючи, що траєкторії руху зважених частинок близькі до кругових, можна величину виникаючої сили інерції прийняти пропорційною квадрату тангенціальної швидкості, масі частинок і обернено пропорційною радіусу обертання. Так, при радіусі обертання менше метра і тангенціальній швидкості в межах 10...15 м/с сила інерції на порядок перевершує силу тяжіння. З цієї причини сепарація частинок в циклонах відбувається набагато інтенсивніше, ніж в гравітаційних осаджувачах.

Оскільки інерційна сила пропорційна масі, то дрібні частинки вловлюються в циклонах погано. Ступінь очищення аерозолів з розмірами частинок понад 10 мкм знаходиться в межах 80...95%, а дрібніших частинок – набагато гірше. Збільшення ефекту осадження частинок за рахунок зменшення діаметру циклону і підвищення швидкості потоку можливо до деякої межі, обмеженої технічними і економічними чинниками, такими як зростання енергетичних витрат, погіршення очищення внаслідок повторного захоплення відсепарованих частинок, абразивний знос, збільшення металоємності і іншими. Для широко поширених циклонів оптимальні значення швидкостей потоків і конструктивних параметрів встановлені дослідним шляхом і приводяться в довідковій літературі.

14.2.1. Конструкції циклонів

Циклони НДІОГаз. В інституті НДІОГаз розроблений ряд конструкцій циліндричних і конічних циклонів. Широкого поширення набули циліндричні циклони (рис. 14.5) ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24. Цифрове позначення циклону відповідає куту нахилу кришки апарату і патрубку, що підводить запилений потік. Для даних циклонів характерна подовжена циліндрична частина корпусу. Циклон ЦН-15У має укорочену конічну частину. Його застосовують при обмеженні по висоті, він має дещо гірші показники, ніж ЦН-15.

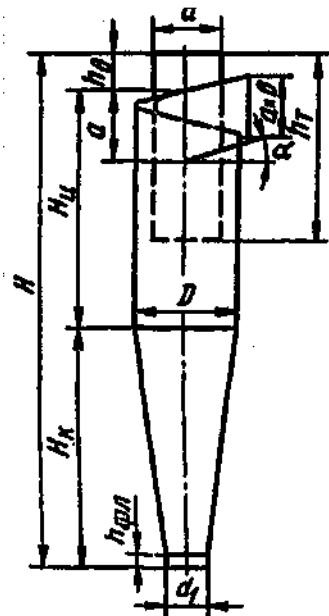


Рис. 14.5. Циклон ЦН конструкції НДІОГаз

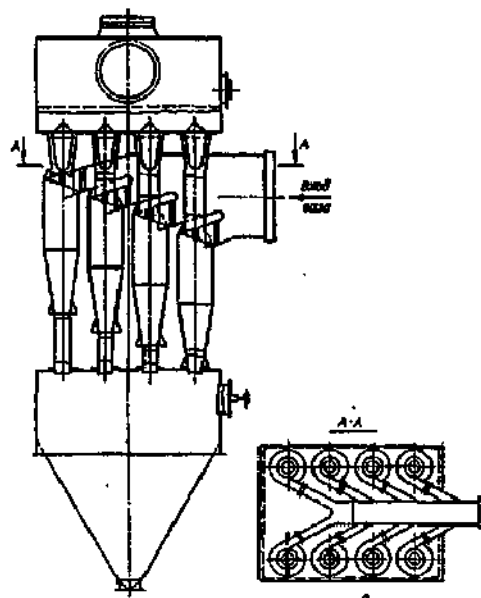


Рис. 14.6. Групова установка циклонів ЦН

Циклон ЦН-11 призначений для очищення повітря (газів) від сухого неволокнистого пилю, що не злипається, утворюється в різних помольних і дробильних установках і при транспортуванні сипких матеріалів.

Для вловлювання вибухонебезпечного і легкозаймистого пилю циклони ЦН повинні бути виконані за спеціальними кресленнями і не мати вузлів, де могло б відбуватися скупчення пилю, і повинні бути забезпечені необхідною кількістю вибухових клапанів.

Циліндричні циклони ЦН залежно від необхідної продуктивності можна встановлювати одиночно або компонувати в групи по два, чотири, шість, вісім циклонів (рис. 14.6).

Співвідношення розмірів (у долях внутрішнього діаметру) для циклонів ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24 подано в табл. 14.2.

Таблиця 14.2.

Співвідношення розмірів (у долях внутрішнього діаметру) для циклонів ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24

Найменування	Тип циклону	
	ЦН-15; ЦН-15у; ЦН-24	ЦН-11
Внутрішній діаметр вихлопної труби, d	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 циклону, D_{cp}	0,8 для всіх типів	
Висота установки фланця, h_{ϕ}	0,1 для всіх типів	
Кут нахилу кришки і вхідного патрубку циклону, α	15*; 15*; 24*	11*
Висота вхідного патрубку (внутрішній діаметр), a	0,66; 0,66; 1,11	0,48
Висота вихлопної труби, h_T	1,74; 1,5; 2,11	1,56
Висота циліндрової частини циклону, $H_{\text{ц}}$	2,26; 1,51; 2,11	2,06
Висота конуса циклону, $H_{\text{к}}$	2,0; 1,50; 1,75	2,0
Висота зовнішньої частини вихлопної труби, $h_{\text{в}}$	0,3; 0,3; 0,4	0,3
Загальна висота циклону, H	4,56; 3,31; 4,26	4,38

До конічних циклонів НДІОгаз відносяться апарати СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М (рис. 14.2,г; табл. 14.3). Циклони мають подовжену конічну частину і спіральний вхідний патрубок. Циклони володіють високою ефективністю очищення. Вони призначалися для вловлювання сажі.

Таблиця 14.3.

Співвідношення розмірів (у долях діаметру D) для циклонів СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М

Найменування	Тип циклону		
	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
Внутрішній діаметр циліндричної частини, D	До 3500 мм		До 4000 мм
Висота циліндричної частини, $H_{ц}$	0,535	0,515	0,4
Висота конічної частини, H_k	3,0	2,110	2,6
Внутрішній діаметр вихлопної труби, d	0,334	0,340	0,22
Внутрішній діаметр пиловипускного отвору, d_l	0,334	0,229	0,18
Ширина вхідного патрубка, b	0,264	0,214	0,18
Висота зовнішньої частини вихлопної труби, h_B	0,2-0,3	0,2-0,3	0,3
Висота установки фланця, $h_{фл}$	од	од	од
Висота вхідного патрубка, a	0,535	0,515	0,4
Довжина вхідного патрубка, l	0,6	0,6	0,6
Висота заглиблення вихлопної труби h_T	0,535	0,515	0,4
Поточний радіус равлика, r	$D/2+b\phi/2\pi$	$D/2+b\phi/\pi$	$D/2+b\phi/\pi$

Фракційна ефективність циклонів ЦН-11, ЦН-15 і конічних циклонів представлено на рис. 14.7.

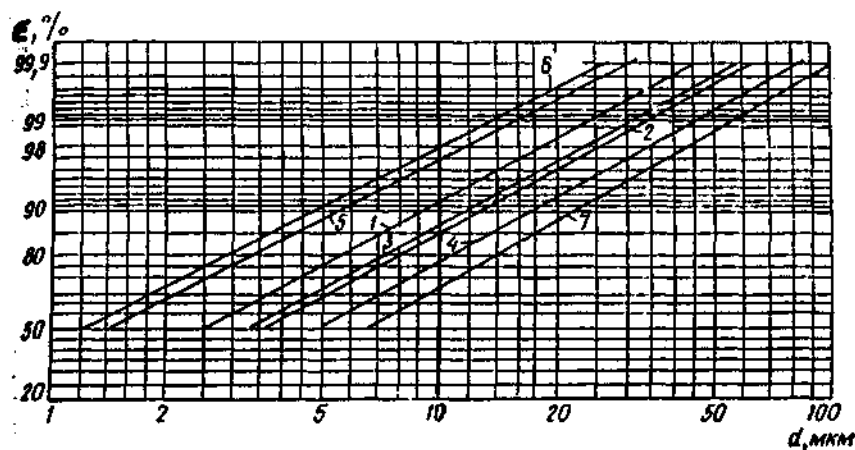


Рис. 14.7. Фракційна ефективність циклонів ЦН НДІГаз: 1 – ЦН-11; 2 – ЦН-15; 3 – ЦН-15У; 4 – ЦН-24; 5 – СДК-ЦН-33; 6 – СК-ЦН-34.

Циклони СІОП (Свердловський інститут охорони праці) повністю позбавлені циліндричної частини. Вихлопна труба опущена у верхню частину конуса. Вхідний патрубок має трикутний перетин (рис. 14.8, табл. 14.4). Циклони СІОП застосовують для очищення газів (повітря) від сухого неволокнистого пилу, що не злипається.

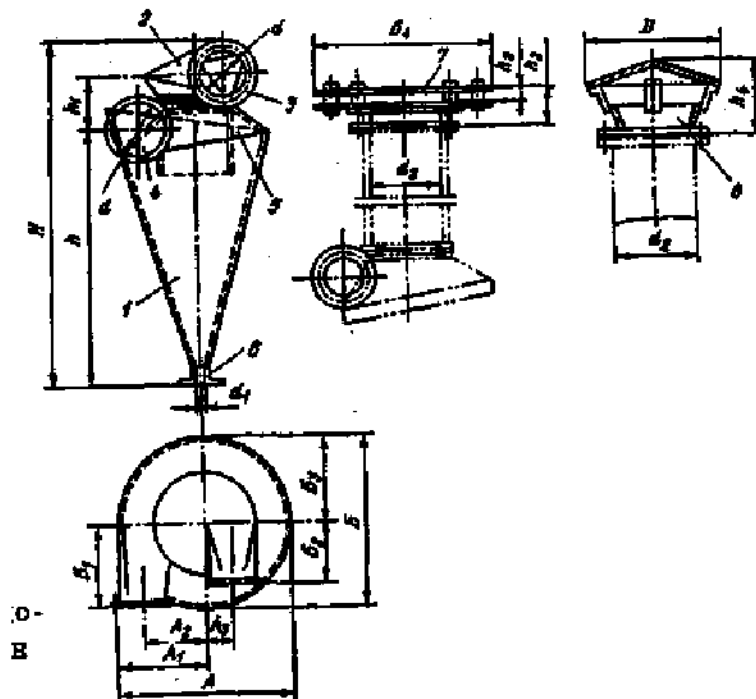


Рис. 14.8. Циклон конструкції СІОП: 1 – корпус; 2 – розкручувач; 3,4 – вхідний і вихідний патрубки; 5 – кришка корпусу; 6 – пиловідвідний патрубок; 7 – розкручувач; 8 – ковпак.

При встановленні циклону на всмоктуючій лінії вентилятора очищений газ (повітря) виходить з апарату через розкручувач з гвинтовою кришкою, а при установці на нагнітальній лінії – через шахту з ковпаком або розкручувачем у вигляді плоского щита.

Таблиця 14.4.

Циклони конструкції СІОП

Номер циклону	Продуктивність, тис. м/год	Розміри, мм									Маса, кг
		A_1	A_2	A_3	B	H	h	h_1	d		
1	1,5	703	264	135	675	1720	1360	235	170	68	51
2	3	1045	380	195	970	2455	1960	335	245	98	102
3	4,5	1242	465	240	1184	2995	2400	407	300	120	148
4	6	1428	535	275	1363	3440	2765	460	345	138	195
5	7,5	1595	597	310	1520	3830	3075	525	385	154	244
6	8,5	1698	635	330	1620	4080	3280	555	410	164	275
7	10	1943	690	335	1758	4423	3555	605	445	178	323

Циклони ВЦНІОП. Циклони зі зворотнім конусом розроблені ВЦНІОП (м.Москва) (рис. 14.9, табл. 14.5).

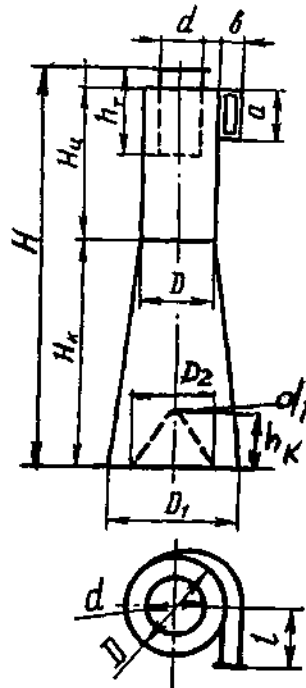


Рис. 14.9. Циклон ВЦНПОП

Застосовують для вловлювання сухого, що не злипається, не волокнистого і абразивного; а також слабкозлипаємого (сажа, тальк) пилю. Пилогазовий потік проходить в бункер через кільцеву щілину між двома сполученими осьовими конусними поверхнями. Знепилений газ (повітря) повертається в корпус циклону через отвір у вершині внутрішнього конуса.

Таблиця 14.5.

Співвідношення розмірів (у долях діаметру D) для циклонів типу ВЦНПОП

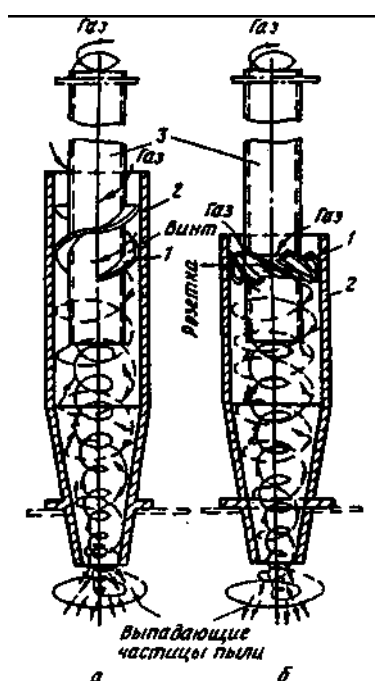
Найменування	Величина
Внутрішній діаметр циліндрової частини, D	До 1000 мм
Висота циліндрової частини, H_u	2,0
Висота конічної частини, H_k	3,0
Внутрішній діаметр вихлопної труби, d	0,5
Діаметр нижньої частини конуса, D_1	1,6
Діаметр внутрішнього конуса, D_2	1,4
Діаметр отвору внутрішнього конуса, d_1	0,1
Висота внутрішнього конуса, h_k	0,68
Висота заглиблення вихлопної труби, h	2,1
Повна висота циклону, H	5,2
Довжина вхідного патрубку, l	0,6
Висота вхідного патрубку, a	1,0
Ширина вхідного патрубку, b	0,25

Для уніфікації циклонів в інституті охорони праці (Санкт-Петербург) були проведені порівняльні випробування за єдиною методикою. За результатами випробувань циклон ЦН-11, як такий, що володіє найбільшою ефективністю і добре пристосований для групової установки, був рекомендований для переважного застосування. Циклони ЦН-15, СЮП і ВЦНПОП дещо поступаються в ефективності циклону ЦН-11, але мають певні переваги в габаритах: циклон СЮП по висоті на 30% менший, ніж ЦН-11, але більший нього по діаметру на 17%; діаметр циклону ЦН-15 на 10% менший, ніж ЦН-11.

Циклони великих розмірів мають гірші показники очищення, і тому часто для досягнення необхідної пропускної спроможності компонують групи циклонів меншого діаметру. Компоновка може виконуватися у вигляді прямокутника або круга. Групи циклонів зазвичай мають загальні підвідні і відвідні колектори, об'єднаний пилозбірник. Бункери груп до 4 циклонів можуть виконуватися круглої і прямокутної форми, вище 4 – тільки прямокутної. Групи рекомендується компонувати з парного числа циклонів. Загальна кількість циклонів в групі може бути доведене до 16, проте більше 8 циклонів компонувати разом небажано. При великому числі циклонів практично неможливо організувати рівномірний розподіл газів до всіх апаратів, що призводить до нерозрахункових режимів їх роботи і істотного зниження ступеня очищення газу. Погіршує очищення і перетікання пилу в загальному бункері, через що він інтенсивніше, ніж в одиночних циклонах, захоплюється очищеним газом.

Батарейні циклони. При необхідності забезпечення великої пропускної спроможності використовують батарейні циклони (мультициклони). Вони складаються з циклонних елементів, що об'єднані в одному корпусі і мають загальний бункер. Підключення циклонів паралельне від загального колектора забруднених газів, відведення очищеного газу також об'єднане. Циклонні елементи можуть бути з оборотним потоком або прямоточні. Прямоточні елементи володіють усіма недоліками аналогічних одиночних циклонів і використовуються рідше оборотно-потоківих. У вітчизняних циклонних елементах підведення забруднених газів проводиться коаксіально через завихорювачі типу “гвинт” і “розетка” (рис. 14.10, *а і б*) або тангенціально через укорочені равлики (рис. 14.10, *в*); чотирьохзахідний равлик (рис. 14.10, *г*).

Розеткові завихорювачі в порівнянні з гвинтовими забезпечують вище очищення газу, але більшою мірою схильні до забивання пилом. Для пилу третьої групи злипаємості направляючі типу “розетка” не рекомендуються, а пил четвертої групи (сильнозлипаючийся) взагалі небажано очищати в батарейних циклонах.



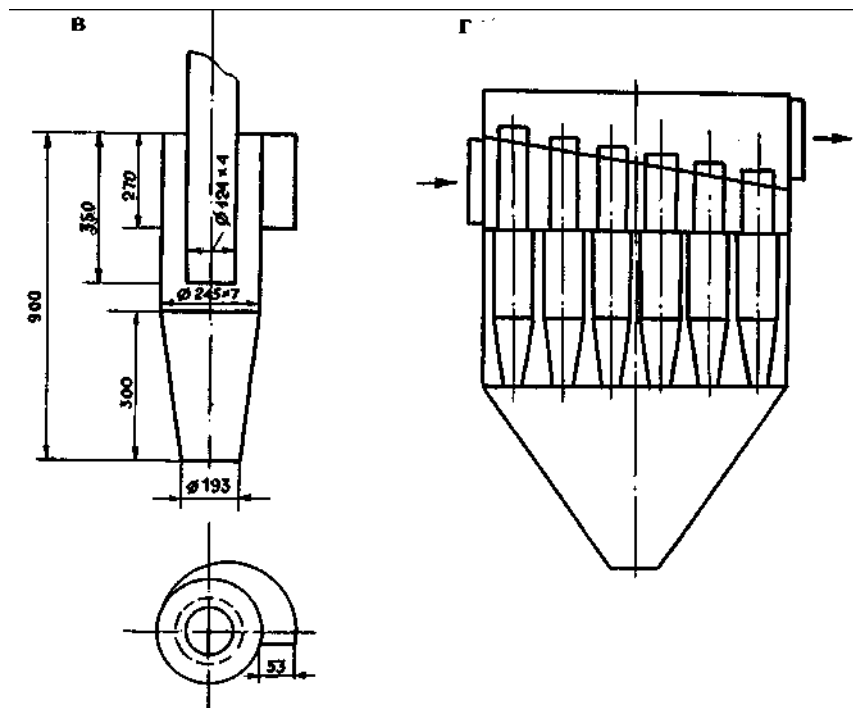


Рис. 14.10. Циклонні елементи батарейного циклона: *а* – з направляючим апаратом типу “винт”; *б* – з направляючим апаратом типу “розетка”; *в* – вхід через укорочені равлики; *г* – чотирьохзахідний равликовий вхід

Елементи з напівравликовим підводом мають кращі показники очистки за рахунок герметичності вузла введення газів. В той же час ступінь очистки газів в батарейних циклонах будь-яких типів нижча, ніж в одиночних циклонах. Недоліки, притаманні груповому встановленню циклонів, в батарейних циклонах посилюються великим числом елементів, які об’єднуються. Технічні характеристики деяких типів батарейних циклонів із оборотно-поточними елементами наведені в таблиці 14.6, а з прямоточними – в таблиці 14.7.

Таблиця 14.6.

Технічні характеристики батарейних циклонів з оборотно-поточними елементами

Тип циклону	Число елементів, шт	Оптимальна швидкість газів в елементі, м/с	Пропускна спроможність, м³/с	Коефіцієнт опору	Тип направляючого апарату елементу	Область застосування
ЦБ-254Р	25; 30; 40; 50; 60; 80	4,5	5,5...16	90	розетка	очищення високотемпературних газів (до 400°C) від золи і пилу
БЦ-2	20; 25; 30; 36; 42; 46	4,5	4,2; 5,25; 6,3; 7,55; 9,2; 11,7	65	розетка	очищення незаймистих пожежовибухонебезпечних аерозолів з температурою до 150°C
ПБЦ	24; 36; 48; 92; 116; 140	3,5	3,3; 7; 9,7; 13,9; 20,8; 27,8	120	напівравликовий	

Таблиця 14.7.

Технічні характеристики батарейних циклонів з прямоточними елементами.

Тип циклону	Кількість секцій	Кількість елементів в одній секції		Пропускна спроможність м³/с	Область застосування
		по довжині	по ширині		
БЦ1х8х8...БЦ 1х11х16	1	8...11	8...16	8,5...27,3	Очищення від крупної золи продуктів згорання
БЦ2х5х6...БЦ 2х11х16	2	5...1	6...16	8...54,7	

БЦ 3х8х9	3	8	9	33,5	парогенераторів
БЦ 4х8х9...БЦ 4х11х18	4	8...11	9...18	38,7...121	продуктивністю
БЦУ-М	1...2	10...14	7...24	13...240	25...320 т/год

14.2.2. Розрахунок циклонів

При проектуванні циклону вибирають його геометрію, потім визначають розмір, фракційну ефективність, перепад тиску і потрібну для кожного циклону потужність. Ці розрахунки ґрунтуються на заданих швидкості потоку газу, складі, температурі, тиску, концентрації пилу, а також на даних про дисперсний склад пилу. Ці дані необхідні, щоб сформулювати вимоги до пристрою для вторинного уловлювання пилу, якщо таке передбачається використовувати.

Циклони зазвичай вибирають з числа серійних, виходячи з продуктивності по газовому потоку. Надалі проводять розрахунок критичного (мінімального) діаметру частинок d , повністю уловлюваних апаратом, ефективності уловлювання пилу η і гідравлічного опору циклону $\Delta P_{Ц}$.

Критичний розмір частинок може бути знайдений, наприклад, по наступній залежності:

$$d_9 = 3 \{ \frac{V_4}{\Gamma} > D < p \cdot \chi + b \} / [p M J^2 f^5 M D_4 + b] / 2 D_4 \Gamma, \quad (14.22)$$

де Γ - об'ємна витрата газу, м³/с; χ - швидкість газу на вході в циклон, м/с; D_4, b - характерні розміри циклону, показані на рис. 4.11.

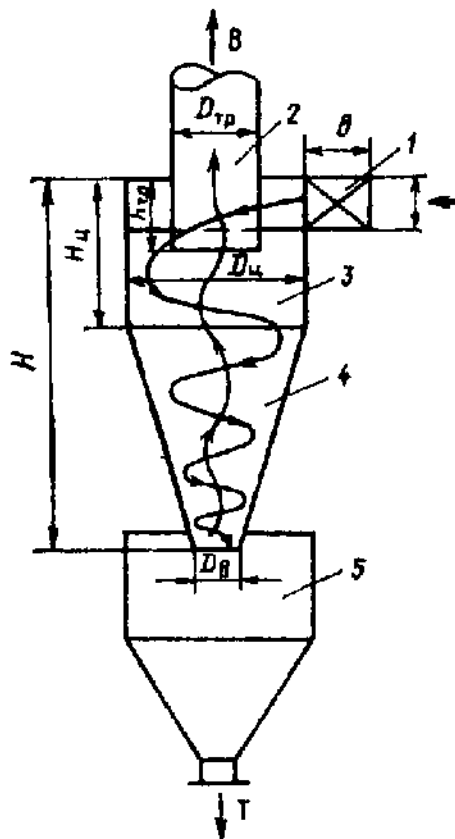


Рис. 14.11. До розрахунку одиночного циклону: 1 - вхідний патрубков; 2 - вихідна труба; 3 - циліндрова камера; 4 - коническая камера; 5 - пилоосаджувальна камера.

Об'єм циклону V_4 розраховують по залежності на основі геометричних параметрів, приведених на рис. 14.11:

$$V_{..} = (*/4)\{[(Я-Я)/(2Э, -D.)w>1 " Д3)/3] +$$

Ефективність уловлювання можна розраховувати по залежності:

$$* = 1 - \exp[-2(z^{\wedge 2} \ll^{+2})]. (14.24)$$

Величину z в залежності (4.24) розраховують по рівнянню:

$$\begin{aligned} & \text{г} \quad 21 \quad 2 \quad \mathbf{i} \quad \text{‘(14.25)} \\ & \wedge f \wedge \mathbf{l} \text{ я} \left(\begin{matrix} DA \\ 1 \end{matrix} \partial o \right. \\ & \times 1 \text{ч} \text{---} \text{ч} \text{---} - \quad \text{ч} \text{-----} \text{---} > \\ & \quad \quad \quad D \quad [D] \quad D \quad [D] \quad D \quad D \\ & \quad \quad \quad \text{ц} \quad \vee \quad \text{ц} \quad J \quad \quad \quad \text{ц} \quad \vee \quad \text{ц} \quad J \quad \text{ц} \quad \text{ц} \end{aligned}$$

де

$$l/D4 = IXDjDJIEilFji*; (14.26)$$

$$A/A = [4 - (A, -3Д(A, +/-Я,)/(Я-Я))] / >. (14.27)$$

Величина $\wedge$ у рівнянні (14.24) є не що інше, як модифікований інерційний параметр, що характеризує стан пилогазової суміші:

$$\Gamma = [d24pyJS^{\wedge}D4)](n + \vee). (14.28)$$

Значення n може бути знайдене по формулі

$$n = 1 - (1 - 0,016Z>,,)^{0Д4} (Tz/283)^{0'3} (14.29)$$

де Tz - абсолютна температура газів, До.

Гідравлічний опір циклонів можна розрахувати по загальноприйнятій для однофазних потоків формулі:

$$Ap, = \wedge, 2л/2 (14.30)$$

де **ярем** - швидкість газу у вільному перетині циклону;

$J_{ц}$ - коефіцієнт опору циклону, розрахований за швидкістю **ярем** і залежний від стану поверхні апарату, концентрації і властивостей частинок, тому визначається для кожної конструкції по довідниках.

У циклонних апаратах формуються складні потоки, аеродинамічні параметри яких (швидкості, тиск, концентрації частинок забруднювачів і їх фракційний склад) безперервно міняються. Методи теоретичного визначення коефіцієнтів очищення із-за значної розбіжності результатів з досвідом непридатні для практичного використання. З емпіричних методів найбільш надійні розрахунки по парціальних коефіцієнтах очищення, знайдених експериментально.

Як показує досвід, величини парціальних коефіцієнтів осадження для багатьох типів циклонів цілком задовільно апроксимуються прямою лінією в імовірнісно-логарифмічній системі координат. Це дозволяє використовувати функції нормального розподілу при підрахунку повного коефіцієнта осадження.

Циклони вибирають по розрахунковій продуктивності апарату і розрахунковій швидкості газу (повітря) при вході в циклон із забезпеченням необхідної ефективності очищення при мінімальних енергетичних витратах (тобто при мінімальному гідравлічному опорі).

Загальний гідравлічний опір циклону рівний

$$APЦ = C_{BX} vJ-p/2 (14.31)$$

де J_{BX} - коефіцієнт гідравлічного опору циклону; v_{BX} - швидкість потоку у вхідному патрубку, м/с.

Загальний гідравлічний опір циклону визначають також по умовній швидкості газу (повітря) в циклоні v_0 , віднесеною до площі вільного перетину циліндрової частини циклону

$$APQ = C_{ov02} p / 2 \quad (14.32)$$

де J_0 - коефіцієнт гідравлічного опору циклону, віднесений до швидкості в повному перерізі циклону;

v_0 - знаходиться зазвичай в межах 3...3,5 м/с.

Для більшості циклонних апаратів коефіцієнт J , постійний і не залежить від числа Re .

Значення коефіцієнтів гідравлічного опору ряду циклонів приведені в табл. 14.8.

Таблиця 14.8.

Коефіцієнти гідравлічного опору циклонів

Тип циклону	Діаметр, мм	Без улитки		С улиткой на выхлопной трубе	
ЦН-11	450	6Д	250	5,2	210
ЦН-15	450	7,6	160	6,7	140
ЦН-15у	450	8,2	170	7,5	100
ЦН-24	450	10,9	80	12,5	90
СИОТ		6,0	-	4,2	-
ВЦНИИОТ	370	9,3		10,4	
ЛИОТ	700	4,2	460	3,7	411
цкк		5;2			
РЦ ЦБР		5,0 9,6	-	-	-

У значення коефіцієнта гідравлічного опору циклонів НДІгазу вносять поправки, що враховують діаметр циклону і запилена повітря (газу) при вході в циклон: $z = J_{\text{Лухг}} \cdot \Lambda_{\text{абл}}$, - де K_1 - поправочний коефіцієнт на діаметр циклону (табл. 14.9); K_2 - поправочний коефіцієнт на запилену потоку (табл. 14.10); $\Lambda_{\text{абл}}$ - коефіцієнт місцевого опору циклону по табл. 14.8.

Таблиця 14.9

Поправочний коефіцієнт K_1 на діаметр циклону

Діаметр циклону, 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
450	0,99	1,0	1,0
500	1,0	1,0	1,0

Таблиця 14.10

Поправочний коефіцієнт K_2 на запилену ($D = 500$ мм)

Тип циклону	Поправочний коефіцієнт K_2 , при запиленій г/м						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	j	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,5
ЦН-15		0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15у		0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24		0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33		0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34		0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК-ЦН-34М		0,99	0,97	0,95			

Для розрахунку циклонів необхідні наступні дані:

- витрата газу (повітря), підмета очищенню за робочих умов, До., м /с;

- щільність газу за робочих умов ρ_g , кг/м³ ;

- динамічна в'язкість газу при робочій температурі η , Па з;

- дисперсний склад пилу, який задається двома параметрами: dm і $lga4$:

- dm - такий розмір пилу, при якому кількість частинок більше dm рівне кількості частинок дрібніше dm $lga4$, - середнє квадратичне відхилення у функції розподілу частинок по розмірах;

- запилена газу $C_{вх}$, г/м³;

- щільність частинок пилу $\rho_{ч}$, кг/м³ ;

- необхідна ефективність очищення газу ϵ %.

Розрахунок циклонів виконують в такій послідовності: 1. Задаються типом циклону. По табл. 14.11. визначають оптимальну швидкість газу в апараті vonT-

Таблица 14.11.

Параметри, що визначають ефективність циклонів

Параметри	цн-24	ЦН-15у	цн-15	цн-11	сдк-цн-33	ск-цн-34М	ск-цн-34	сиот	ВЦНИЙот
d_{50} , мкм $lga4^T$	8,50	6,00 0,283	4,50	3,65	2,31	1,95 0,308	1,13	2,6	8,6 0,32
$V_{опт}$ м/с	0,308 4,5	3,5	0,352 3,5	0,352 3,5	0,364 2,0	11,7	0,340 2,0	0,28 1,00	4,00

Примітки: 1. Значення d_{50} в таблиці, відповідають наступним умовам роботи циклонів: середня швидкість газу в циклоні $v = 3,5$ м/с; діаметр циклону $D = 0,6$ м; щільність частинок $\rho_{ч} = 1930$ кг/м³ ; динамічна в'язкість газу $\eta = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Пас.

2. Визначають необхідну площу перетину циклону, м:

$$F = \frac{V}{v_{опт}} \quad (14.33)$$

3. Визначають діаметр циклону, м, задаючись кількістю циклонів N :

$$D = \sqrt[4]{\frac{F}{N}} \quad (14.34)$$

Діаметр циклону округляють до стандартної величини.

4. Обчислюють дійсну швидкість газу в циклоні

$$v = \frac{V}{F} \quad (4.35)$$

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

5. Приймають по табл. 4.8. коефіцієнт гідравлічного опору для даного циклону. Для циклонів Ніїогаз вносять поправки по табл. 4.8-4.10.

6. Визначають втрати тиску в циклоні, Па, по формулі

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho_g v^2}{2} \quad (14.36)$$

Якщо втрати ΔP прийнятні, переходять до визначення ефективності очищення газу в циклоні.

7. Приймавши по табл. 4.11. значень d_{50}^T і lga ачт для табличних умов, визначають значення d_{50} за робочих умов (діаметрі циклону, швидкості потоку, щільності пилу, динамічної в'язкості газу) по рівнянню

$$\left(\frac{d_{50}^T}{d_{50}} \right)^{112} = \frac{K D m \rho_{ч}}{\eta} \quad (14.37)$$

8. Визначають параметр λ по формулі

$$\lambda = \frac{1}{\Phi(x)} \quad (4.38)$$

9. По табл. 14.1 визначають значення $\Phi(x)$, яке є ефективністю очищення газу, вираженою в долях одиниці. Набутого значення порівнюють з потрібним. Якщо воно менше потрібного, приймають інший циклон і розраховують його.

Наближене визначення ефективності уловлювання пилу в циклоні може бути виконане за допомогою номограми, мал. 4.12., з урахуванням типу циклону, його діаметру, гідравлічного опору, середнього медіанного розміру пилу, її щільності, температури середовища.

Користування номограмою (рис. 14.12) показано на прикладах:

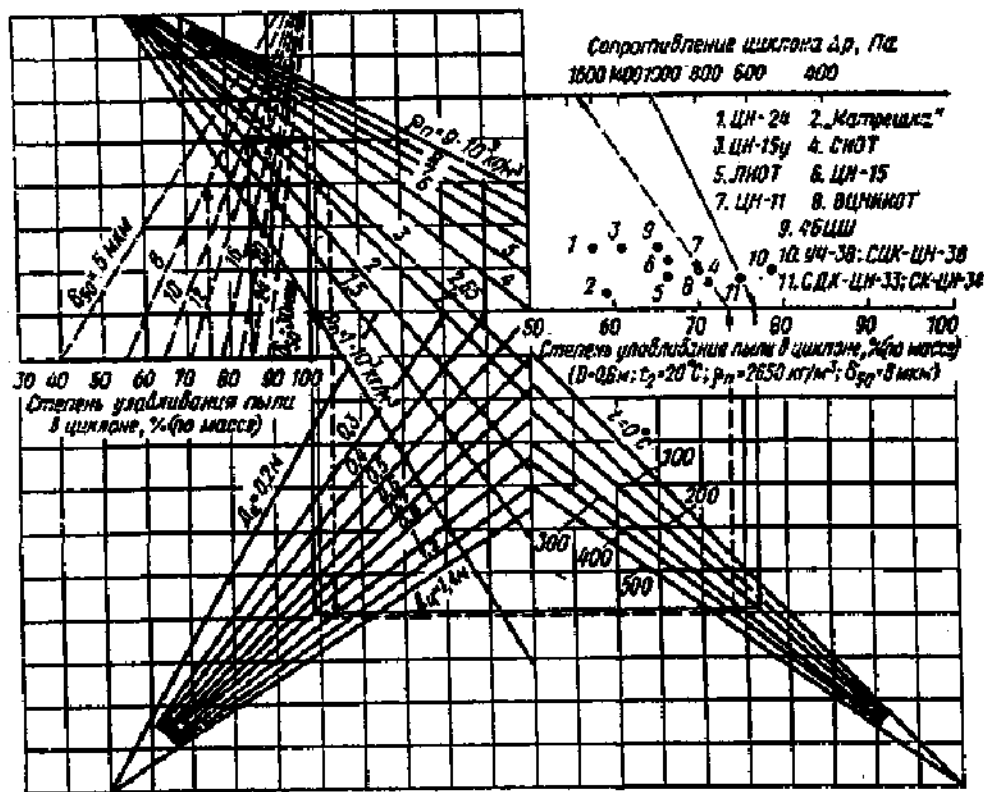


Рис. 14.12. Номограма для визначення ефективності циклону.

Розрахунок послідовно встановлених циклонів. У практиці експлуатації очисних пристроїв іноді застосовують послідовну установку циклонів, що розрізняються по конструкції. Розрахунки таких груп циклонів найпростіше виконувати по величині парціального проскакування через кожен апарат.

Можна прийняти наступний порядок розрахунку:

1. Визначають значення d_{50} для кожного зі встановлених циклонів як для що самостійно працюють по викладеній вище методиці.

2. Для кожного з циклонів знаходять діаметри частинок, що уловлюються на 15,9%, по формулі:

$$\lg \frac{d_{15.9}}{d_{50}} = \lg \alpha - \lg \beta_{50} \quad (14.40)$$

3. У імовірісно-логарифмічній системі координат наносять точки $d_{15.9}$ і d_{50} і проводять через них прямі, отримуючи тим самим лінії парціальних проскакувань через кожен циклон.

4. Визначають величини парціальних проскакувань ϵ , через всі циклони перемножуванням парціальних проскакувань ϵ , через кожен циклон:

$$\epsilon_y = \prod_{i=1}^N \epsilon_{yi} \quad (14.41)$$

де N - кількість послідовних циклонів.

5. Набутих значень ϵ , наносять на графік, апроксимують крапки прямою лінією, знаходять по ній значення D_{50} і $lgcr$.

6. По рівнянню (14.38) знаходять значення JC , а з таблиці 14.1 - $\Phi(x)$, яке вважають рівним повному коефіцієнту очищення газів, що послідовно пройшли через всі циклони.

Послідовна установка однотипних циклонів не практикується, хоча є зведення про успішний досвід застосування і такого способу сепарації.

Розрахунок групових і батарейних циклонів. Розрахунки циклонів, що працюють паралельно в груповій установці, виконують так само, як і індивідуальних. Погіршення ступеня очищення із-за нерівномірності розподілу потоків і перетікань пилу з одного циклону в іншій через загальний бункер до уваги не приймається.

Розрахунки батарейних циклонів виконують в наступному порядку.

1. Задаються оптимальною швидкістю потоку w_{0IIr} в межах 3Д..5 м/с. Нижня межа лімітується небезпекою забивання направляючого апарату, верхній - інтенсифікацією абразивного зносу елементів і віднесення пилу.

2. Розраховують витрату газу через один елемент V_l .

$$G_l = 0,785 w_{0IIr} V_c \quad (14.42)$$

Діаметр циклонного елементу D зазвичай приймають в межах 250 мм. Подальше зменшення діаметру не приводить до збільшення ступеня очищення.

3. Визначають кількість елементів:

$$N = V_l / V_x \quad (14.43)$$

4. Приймають типову конструкцію батарейного циклону з близькою пропускною спроможністю і числом елементів так, щоб швидкість в окремому елементі не виходила за межі оптимальних значень.

5. По уточненій швидкості потоку в елементі визначають аеродинамічний опір циклону AP :

$$AP = g p w^2 / 2, \text{ Па.} \quad (14.44)$$

Коефіцієнт гідравлічного опору δ приймають за досвідченими даними.

6. Коефіцієнт очищення газу в елементі циклону m_x визначають по методиці розрахунку індивідуального циклону, використовуючи досвідчені значення d_{50} і $lgcr$ прийнятого типу елементу. Коефіцієнт очищення газу в батарейному циклоні при великій кількості елементів може бути нижче на 20...25%, чим в одиночному елементі, що обов'язково слід враховувати при вибиранні засобів очищення.

14.3. Вихрові пиловловлювачі

Вихрові пиловловлювачі з'явилися в промисловості в 50-х роках, але вони встигли набути значного поширення. У вихровому пиловловлювачі, як і в циклоні, сепарація пилу заснована на використанні відцентрових сил. Основною їх відмінністю від циклонів є наявність допоміжного завихрюючого газового потоку.

Застосовують два види вихрових пиловловлювачів: соплові (рис. 14.13, а) і лопаточні (рис. 14.13, б).

У апараті того і іншого типу запилений газ поступає в камеру через вхідний патрубок із завихрювачем типу “розетка” і обтічником. У кільцевому просторі між корпусом апарату і вхідним патрубком розташована підпінна шайба, яка забезпечує безповоротний спуск пилу в бункер.

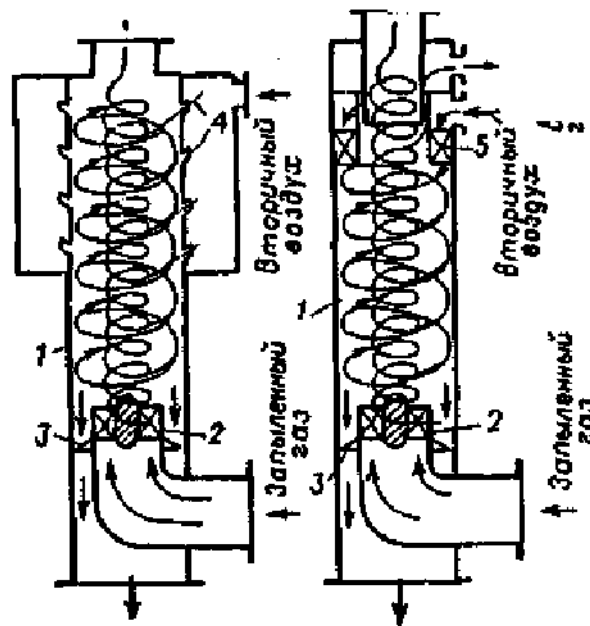


Рис. 14.13. Вихрові пиловловлювачі соплового (а) і лопаточного (б) типів: 1 – камера; 2 – лопаточний завихрювач; 3 – підпінна шайба; 4 – сопла; 5 – кільцевий лопаточний завихрювач.

У вихровому апараті соплового типу (рис. 14.13, а) запилений потік закручується лопаточним завихрювачем і рухається вгору, піддававшись при цьому дії витікаючих з тангенціально розташованих сопел струменів вторинного газового потоку. Під дією відцентрових сил зважені в потоці частинки відкидаються до периферії, а звідти – в створюваний струменями вихровий потік вторинного газу, що направляє їх вниз в кільцевий міжтрубний простір. Обтічник направляє потік газу до периферії. Пилові частинки за рахунок дії відцентрових сил переміщуються з центральної частини потоку до периферії.

Далі процес в апаратах двох видів дещо відрізняється. У сопловому апараті на запилений потік впливають струмені вторинного повітря (газу), що виходять з сопел, розташованих тангенціально. Потік переходить в обертальний рух.

Відкинуті під дією відцентрових сил до стінок апарату пилові частинки захоплюються спіральним потоком вторинного повітря (газу) і разом з ним рухаються вниз в бункер. Тут частинки пилу виділяються з потоку, а очищене повітря (газ) знову поступає на очищення.

Сопла для подачі вторинного повітря потрібно розташувати по низхідній спіралі. Оптимальною є установка 8 сопел діаметром 11 мм двома спіральними рядами під кутом нахилу 30° . Як оптимальне рекомендується встановлення лопаток завихрювача під кутом $30^\circ \dots 40^\circ$ при відношенні діаметру завихрювача до діаметру апарату, рівному 0,8...0,9.

Вихровий пиловловлювач лопаточного типу (рис. 14.13, б) відрізняється тим, що вторинний потік вводиться у верхній частині апарату через завихрювач. У апараті лопаточного типу вторинне повітря, відібране з периферії очищеного потоку, подається кільцевим направляючим апаратом з похилими лопатками. За основними показниками апарати лопаточного типу виявилися ефективнішими: при однаковому діаметрі камери – 200 мм і продуктивності 330 м/год гідравлічний опір соплового апарату склав $3,7 \cdot 10^3$ Па, ефективність 96,5%, а лопатки – відповідно $2,8 \cdot 10^3$ Па і 98% (при вловлюванні особливо дрібнодисперсного пилу).

Застосовують наступні способи підведення до вихрового пиловловлювача повітря, необхідного для закручування потоку, що знепилюється: з навколишнього середовища, з очищеного потоку, із запиленого потоку. Перший варіант доцільний, якщо очищенню піддається гарячий газ, який необхідно охолодити. Застосовуючи другий варіант, можна дещо підвищити ефективність очищення, оскільки для використання в якості вторинного повітря відбирають периферійну частину потоку очищеного повітря з найбільшим вмістом залишкового пилу. Третій варіант найбільш економічний: продуктивність установки підвищується на 40...65% із збереженням ефективності очищення.

Продуктивність вихрового пиловловлювача по газу можна змінювати в межах від 0,5 до 1,15 по відношенню до номінальної. Це пояснюється вирішальним впливом на ефективність очищення параметрів вторинного потоку, при збереженні яких залишається незмінною окружна швидкість закручування потоку запилених газів і відповідно відцентрова сила, що діє на частинки пилу.

Вихровий пиловловлювач може застосовуватися для очищення вентиляційних і технологічних викидів від дрібнодисперсного пилу в хімічній, нафтохімічній, харчовій, гірничорудній і інших галузях промисловості. У вихрових пиловловлювачах досягається досить висока для апаратів, заснованих на використанні відцентрових сил, ефективність очищення – 98...99% і вище. На ефективність очищення робить незначний вплив зміна навантаження (у межах від 50 до 115%) і вмісту пилу в повітрі (газі), що очищається, – від 1 до 500 г/м³. Апарат може застосовуватися для очищення газів з температурою до 700°C. У вихровому пиловловлювачі не спостерігається зносу внутрішніх стінок апарату, що пов'язане з особливостями його повітряного режиму. Апарат компактніший, ніж інші пиловловлювачі, призначені для сухого очищення викидів.

Ступінь очищення у вихрових пиловловлювачах значно вищий, ніж в сухих циклонах, і може досягати значень, характерних для мокрих циклонів. Ефективність вихрових пиловловлювачів при очищенні повітря (газу) від ряду пилу і пилоподібних матеріалів, що мають різний медіанний діаметр частинок, характеризують наступні дані (табл. 14.14).

Таблиця 14.14.

Ефективність вихрових пиловловлювачів

Пил або пилоподібний матеріал	Медіанний діаметр частинок, мкм	Ефективність пиловловлювання, %
Синтетичний порошок	4	98,0
Целюлоза	6	96,5
Пральний порошок	10	98,0
Карбонат кальцію	11	99,0
Епоксидна смола	22	98,0
Поліакрилнітрил	32	99,8

За кордоном вихрові пиловловлювачі виготовляються на продуктивність від 330 до 30000 м³/год газу, що очищається (повітря). Одиночні апарати при необхідності можна згрупувати на необхідну продуктивність. Відомі установки з продуктивністю більше 300000 м³/год. Маючи високу ефективність очищення, установки вихрових пиловловлювачів успішно конкурують з електричними і тканинними пиловловлювачами.

Пиловловлювач вибирають, виходячи з витрати запиленого газу, по якому можна розрахувати діаметр апарату:

$$D_a = \left(\frac{4V_z}{\pi v_z} \right)^{0,5} \quad (14.45)$$

де V_z – об’ємна витрата запиленого газу, м³/с; v_z – швидкість газу в робочій зоні пиловловлювача, м/с (рекомендується приймати в межах 5...12 м/с).

Критичний діаметр частинок, що повністю вловлюються в пиловловлювачі, може бути розрахований за однією із залежностей:

$$d_{kp} = \left[\frac{v_z}{H} \ln \left(\frac{\frac{D_a}{D_{mp}}}{\frac{1}{18\mu_z}(\rho_m - \rho_z)\omega^2} \right) \right]^{0,5}; \quad (14.46)$$

$$d_{kp} = \frac{3}{2\pi s} \left[\frac{\mu_z}{\rho_m} \tau \ln \left(1 + \frac{V_2}{V_1} \right) \right]^{0,5}, \quad (14.47)$$

де H – висота пиловловлюючої камери, м; D_{mp} – діаметр патрубку для підведення запиленого газу, м; ω – кутова швидкість газового потоку в апараті, с⁻¹; s – число оборотів потоку газу в пиловловлювачі, $\tau = 1/2\pi R_1^2 H / (V_1 + V_2)$ – час перебування газу в ядрі потоку, с; R_1 – радіус ядра потоку, що приймається рівним радіусу введення первинного потоку, м; V_1, V_2 – об’ємна витрата первинного і вторинного потоків газу, м/с.

Ефективність пиловловлювання (ϵ %) є основним критерієм, за яким оцінюється робота вихрового пиловловлювача, і визначається як відношення кількості вловленого пилу до загальної кількості пилу, що поступає в апарат:

$$\epsilon = \frac{C_n - C_k}{C_n} \cdot 100\%. \quad (14.48)$$

Оскільки запилений газ в пиловловлювач може подаватися двома потоками – через верхній і нижній підвідні патрубки, то загальна ефективність очищення визначатиметься залежно від розподілу потоків по введеннях:

$$\epsilon = \frac{V_1 \cdot \epsilon_1 + V_2 \cdot \epsilon_2}{V}, \quad (14.49)$$

де ϵ_1, ϵ_2 – ефективність пиловловлювання в первинному і вторинному потоках газу.

Величини ϵ_1 і ϵ_2 (у %) можуть бути розраховані із залежностей:

$$\epsilon_1 = \frac{D_{1n}^2 - 4r_{1i}^2}{D_{1n}^2 - D_{sm}^2} \cdot 100\%; \quad (14.50)$$

$$\epsilon_2 = \frac{D_a^2 - 4r_{2i}^2}{D_a^2 - D_{2n}^2} \cdot 100\%; \quad (14.51)$$

де D_{1n} – діаметр введення первинного потоку; D_{em} – діаметр втулки аксіального завихрювача; r_{1i}, r_{2i} – радіус, на якому частинка входить в апарат з потоками газу; D_a – діаметр апарату; D_{2n} – внутрішній діаметр вторинного потоку.

Гідравлічний опір вихрових пиловловлювачів розраховують із залежності, що є аналогічною для розрахунку циклонів:

$$\Delta P = \frac{\xi_{ny} \cdot v_z^2 \cdot \rho_z}{2}, \quad (14.52)$$

де v_z – швидкість газу в робочій зоні апарату, м/с; ξ_{ny} – коефіцієнт гідравлічного опору, що розраховується за швидкістю v_z .

Розділ 15

Фільтрування аерозолів

У фільтраційних сепараторах очищення повітря (газу) від аерозольних забруднень (пилу, сажі, краплинної вологи) відбувається при проходженні забрудненого потоку через шар пористого матеріалу. В якості фільтрувального шару використовують тканини, кокс, гравій і ін.

Фільтрація диспергаційних і конденсаційних аерозолів в пористому середовищі забезпечує високий ступінь осадження зважених частинок з будь-якими розмірами, навіть близьких до молекулярних. Дисперсна домішка вловлюється при обгинанні потоком аерозолію перешкод, утворених на його шляху структурними елементами пористого шару.

Процес фільтрації заснований на багатьох фізичних явищах (ефект зачеплення, зокрема ситовий ефект, – аерозольні частинки затримуються в порах і каналах, що мають перетин менший, ніж розміри частинок; дія сил інерції – при зміні напрямку руху запиленого потоку частинки відхиляються від цього напрямку і осідають; броунівський рух – значною мірою визначає переміщення вискодисперсних субмікронних частинок; дія гравітаційних сил, електростатичних сил – аерозольні частинки і матеріал фільтру можуть мати електричні заряди або бути нейтральними).

Істотними для фільтрації вважаються наступні механізми осадження частинок на перешкодах: торкання (зачеплення), відсіювання (відсів, ситовий ефект), інерційне захоплення, гравітаційне і дифузійне осадження, електростатична взаємодія. Частка внеску кожного з них може змінюватися від 0 до 1 залежно від умов, в яких відбувається осадження.

Перераховані чинники указують причину наближення частинок до перешкоди на відстань, при якій стає можливим їх осадження, тобто відділення від газової фази. Саме ж відділення відбувається у разі утримання частинок на структурному елементі пористого середовища силами міжмолекулярних (вандерваальсових, квантових електричних) або хімічних зв'язків.

Загальним способом взаємодії частинок з перешкодою для всіх різновидів пористих середовищ є торкання, тобто коли перешкодою будуть вловлені (захоплені) і утримані всі частинки, які можуть його задіти (торкнутися, зачепити). Тому частинки, що проходять від перешкоди на відстані менше свого радіусу, вважаються обложеними за рахунок торкання.

В процесі фільтрації практично завжди відбуваються відсіювання і інерційне захоплення частинок. Ситовий ефект визначає ступінь осадження частинок, які по розмірах не проходять крізь пори. Він набуває одного з визначальних значень після осадження на структурних елементах фільтру первинного шару вловлюваних частинок (автошару), який зменшує розміри пор і виконує надалі функції фільтрувального середовища.

Масивні частинки внаслідок інерції не можуть огинати перешкоду разом з газовим потоком. Зійшовши з лінії струму, частинки можуть зіткнутися з

перешкодою або зачепити його. При фільтрації за рахунок інерційного захоплення осідають частинки розміром більше 1 мкм.

Гравітація, дифузія і електростатичні сили роблять вплив на осадження частинок тільки в певних умовах. Гравітаційне осадження може бути помітне, якщо в фільтрувальному середовищі можливе утворення застійних зон, наприклад, в круглих порах і порожнинах.

Частинки розміром менше 0,1 мкм можуть наблизитися до перешкоди, здійснюючи хаотичні переміщення (дифундує) під впливом броунівського руху молекул. Частка дифузійного осадження у вловлюванні крупніших частинок незначна.

Електростатичні сили виявляються при взаємодії носіїв зарядів. Частинки забруднювачів і елементи пористого середовища зазвичай мають невелике число зарядів, нбутих природним чином (при диспергації компактних об'єктів, терті рухомих частинок, адсорбції газових іонів), але сила їх взаємодії невелика. Необхідність обліку електростатичної взаємодії виникає тільки при штучній зарядці фільтрувального матеріалу і частинок.

Більшість фільтрів володіють високою ефективністю очищення. Фільтри застосовують як при високій, так і при низькій температурі середовища, що очищається, при різній концентрації в повітрі зважених частинок.

Відповідним підбором фільтрувальних матеріалів і режиму очищення можна досягти необхідної ефективності очищення у фільтрі практично у всіх необхідних випадках.

Володіючи багатьма позитивними якостями, фільтрувальні пристрої в той же час не позбавлені недоліків: вартість очищення у фільтрах вища, ніж в більшості інших пиловловлювачів, зокрема, в циклонах. Це пояснюється більшою конструктивною складністю фільтрів в порівнянні з іншими апаратами, великою витратою електроенергії. Багато конструкцій фільтраційних пиловловлювачів складніші в експлуатації і вимагають кваліфікованого обслуговування.

За типом структурних елементів пористого шару розрізняють волокнисті, тканинні і зернисті фільтри. У волокнистих фільтрах осадження зважених частинок відбувається на шарах волокон, що утримуються конструкціями у вигляді прямокутних рам, кілець і ін.

15.1. Волокнисті фільтри

У волокнистих фільтрах фільтрувальний шар утворений відносно рівномірно розподіленими тонкими волокнами фільтрувальних матеріалів. Ці фільтри призначені для вловлювання частинок дрібнодисперсного і особливо дрібнодисперсного пилу при його концентрації в повітрі (газі), що очищається, в межах 0,5...5 мг/м³.

Волокнисті фільтри можуть бути підрозділені на тонковолокнисті, глибокі і грубоволокнисті фільтри.

Тонковолокнисті фільтри мають діаметри волокон менше 5 мкм і використовуються для вловлювання високодисперсного пилу і інших аерозольних частинок розміром 0,05...0,1 мкм з ефективністю по субмікронних частинках не менше 99%. Як фільтрувальний матеріал використовується ФП (фільтр Петрянова).

Фільтри з матеріалом ФП часто використовуються для вловлювання небезпечних (високотоксичних, радіоактивних, бактеріологічно заражених і ін.) аерозолів з подальшим знищенням або похованням.

Питома витрата оброблюваних газів на один квадратний метр поверхні фільтру має розмірність швидкості. Ця величина є характеристикою питомого навантаження, а не швидкості.

Питоме навантаження W_{sf}^* на фільтри подібного типу знаходиться в межах 0,01...0,1 м³/м²с, опір чистих фільтрів – в межах 200...300 Па, відпрацьованих – 700...1500 Па. Фільтри призначені для тривалої роботи (від декількох місяців до декількох років) при невисокому вмісті дисперсної домішки (до 0,5 мг/м³) з подальшою заміною, оскільки регенерація відпрацьованих фільтрів неможлива.

Характеристики фільтрів тонкого очищення, які використовуються для обробки технологічних газів, приведені в таблиці 15.1.

Таблиця 15.1.

Характеристики фільтрів тонкого очищення

Марка фільтру	Поверхня, що фільтрує, м ²	Максимальна продуктивність, м/с	Фільтрувальний матеріал	Розміри фільтру, мм	Межа температур, t°С
ФБ-0,5	0,5	0,02	ФПП-25	235x235x256	60
ФБ-2	2	0,06		330x300x390	
ФБ-10	10	0,285		510x510x552	

Для тонкого очищення газових викидів, коли температура середовища, що очищається, вище 60°С і в ній знаходяться речовини, що руйнують матеріали ФП (за наявності в оброблюваних газах речовин, агресивних по відношенню до перхлорвінілу, ацетилцелюлози, поліакрилонітрилу) застосовують фільтри ПФТС, споряджені скловолокном (рис. 15.1). Продуктивність фільтрів 200...1500 м³/год, опір 200...1000 Па.

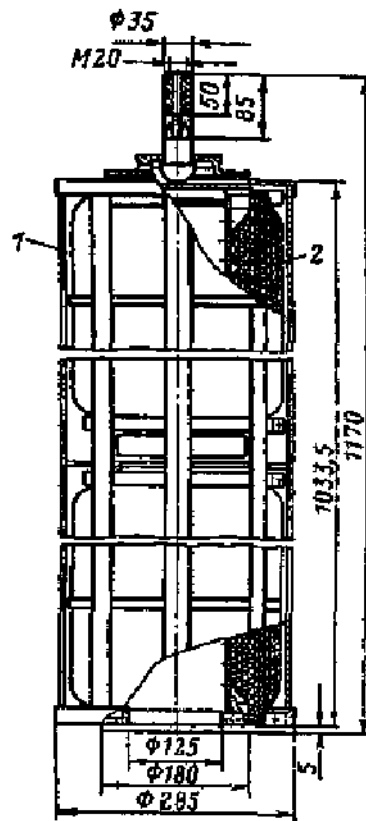


Рис. 15.1. Фільтр ПФТС-500: 1 – каркас; 2 – фільтрувальний пакет

Основного недоліку тонковолокнистих фільтрів (короткий термін служби фільтрувального шару через незастосовуваність регенерації) позбавлені *глибокі фільтри* (фільтри довготривалого користування). Перший шар фільтру на шляху руху середовища, що очищається, складається з грубих волокон, останній шар – з тонких. Діаметр грубих волокон 8...19 мкм. Фільтри мають висоту фільтрувального шару від 0,3 до 2 м і розраховані на роботу при тиску до 0,3 МПа. Фільтр застосовується в системах стерилізації повітря у виробництві антибіотиків, вітамінів і інших біо- і медичних препаратів. Вони можуть застосовуватися і для тонкого очищення деяких видів технологічних газових викидів. Фільтр періодично стерилізують парою, потім просушують сухим повітрям. Вони розраховані на термін служби 10...20 років.

Грубоволокнисті фільтри. Ці фільтри називають також передфільтрами, оскільки їх встановлюють перед тонковолокнистими фільтрами для попереднього очищення повітря (газів). Завдяки цьому знижується вартість очищення, оскільки вартість грубоволокнистих фільтрів майже в 10 разів нижче тонковолокнистих, їх легко замінювати або регенерувати. Фільтрувальний матеріал передфільтру складається з суміші волокон діаметром від 1 до 20 мкм. Фільтр марки ФГ показаний на рис. 15.2. Грубоволокнисті фільтри відрізняються низьким початковим опором (близько 100 Па) і високою пилоємністю. При питомому навантаженні 0,05...1 м³/(м²с) фільтри повинні повністю вловлювати частинки більше 1 мкм.

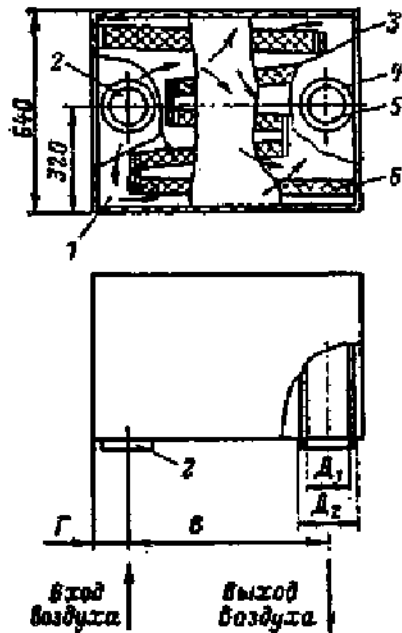


Рис. 15.2. Фільтр грубого очищення ФГ: 1 – форкамера; 2 – вхідний отвір; 3 – корпус; 4 – вихідний отвір; 5 – кільце ущільнювача; 6 – фільтрувальний елемент

15.2. Тканинні фільтри

Широко поширені тканинні фільтри. Рукавні тканинні фільтри застосовуються для очищення великих об'ємів повітря (газів) із значною концентрацією пилу. Фільтрувальними елементами в цих апаратах є рукави із спеціальної фільтрувальної тканини.

Рукавні фільтри забезпечують тонке очищення повітря від пилових частинок, що мають розмір менше 1 мкм. Разом з циклонами рукавні фільтри є одним з основних видів пиловловлюючого устаткування і широко застосовуються на підприємствах чорної і кольорової металургії, хімічній промисловості, промисловості будівельних матеріалів, харчовій промисловості, в енергетичних установках і ін.

Відомі всмоктуючі і нагнітальні рукавні фільтри.

Всмоктуючі фільтри встановлюються до вентилятора, тобто на його всмоктуючій лінії. Нагнітальні рукавні фільтри встановлюються на нагнітальній лінії. Повітря, очищене в рукавах нагнітальних фільтрів, поступає безпосередньо в приміщення, де встановлені фільтри. Недоліком нагнітальних фільтрів, через який їх застосування є не рекомендованим, є надходження повітря після фільтрів в приміщення. За наявності нещільності в рукавах відбувається вибивання пилу в приміщення. Запилене повітря проходить через вентилятор, що викликає швидше зношування вентилятора, а при переміщенні повітря, яке містить пожежо- і вибухонебезпечний пил, це неприпустимо.

Недоліком всмоктуючих фільтрів є наявність значних підсосів повітря.

В експлуатації знаходяться багато конструкцій рукавних фільтрів, що відрізняються формою корпусу, діаметром і довжиною рукавів, видом вживаної фільтрувальної тканини, способом регенерації і ін.

В даний час випускається і експлуатується безліч різноманітних конструкцій тканинних фільтрів. За формою фільтрувальних елементів і тканин вони можуть

бути рукавні і плоскі (полотняні), за видом опорних пристроїв – каркасні, рамні і так далі, за наявністю корпусу і його формою – циліндричні, прямокутні, відкриті (безкамерні), за числом секцій – одно- і багатосекційні. Фільтри можуть також розрізнятися за способом регенерації і рядом інших ознак.

15.2.1. Фільтрувальні тканини

У тканинних фільтрах застосовуються ткані або валяні матеріали, що виконують роль підкладки для фільтрувального середовища, яким є первинний шар вловленого пилу. Тканини для фільтрів виготовляють з натуральних, або синтетичних волокон діаметром 10...30 мкм, що скручуються в нитки діаметром близько 0,5 мм. Розміри пор між нитками зазвичай складають 100...200 мкм.

Ефективність очищення повітря (газів) в рукавних пиловловлювачах в основному залежить від властивостей фільтрувальної тканини, з якої виготовлені рукави апарату, а також від того, якою мірою ці властивості відповідають властивостям середовища, що очищається, і зважених в ній частинок.

При проходженні запиленого повітря (газу) через тканину пилові частинки затримуються між нитками і ворсом. Наявність ворсу підвищує ефективність фільтрації.

Ворс повинен бути обернений назустріч запиленому потоку. При русі запиленого потоку повітря притискує ворсинки до тканини. При зворотному продуванні відбувається випинання ворсинок, і пилові частинки, що накопичилися, віддаляються (рис. 15.3). Якщо ж ворс буде направлений в протилежну сторону, то кількість затриманого пилу зменшується, оскільки відбувається випинання ворсинок. Утруднюється і регенерація, оскільки ворсинки притискаються до ниток і перешкоджають відділенню пилу від тканини.

Чиста тканина не забезпечує необхідну ефективність очищення. Після регенерації на тканині залишається деякий шар пилу. Після декількох циклів (запилення - регенерація і т.д.) тканина набуває робочого стану.

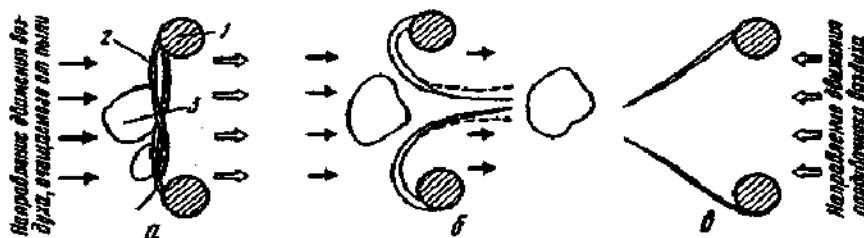


Рис. 15.3. Положення ворсу фільтрувальної тканини при різних режимах роботи: а – робоче положення ворсу: 1 – нитка тканини; 2 – нитка ворсу; 3 – частинки пилу; б – пиловий пробій тканини; в – зворотне продування

У ній створюється залишковий шар пилу, який разом з тканиною утворює фільтрувальний шар. В процесі фільтрації цей шар збільшується. Після чергової регенерації він зменшується до залишкової величини. Зазвичай після декількох циклів запилення і регенерації опір тканини стабілізується. Проте в деяких випадках опір тканини безперервно росте. Це відбувається при застряганні у волокнах

тканини пилових частинок, а також при конденсації вологи на поверхні, замасленні тканини і т.д., внаслідок чого зменшується перетин пор.

Фільтрувальні тканини повинні володіти рядом позитивних якостей: забезпечувати ефективне очищення, допускати достатнє повітряне навантаження, володіти необхідною пилоємністю, здатністю до регенерації, високою довговічністю, стійкістю до стирання і інших механічних дій, низькою гігроскопічністю, невисокою вартістю. До тканини можуть бути висунуті додаткові вимоги, обумовлені властивостями середовища, що очищається: стійкість до певних хімічних речовин і високої температури.

Найбільшого поширення набули фільтри з гнучкими фільтрувальними перегородками.

У фільтрувальних тканинах застосовуються наступні види волокон: природні волокна тваринного і рослинного походження (шерстяні, льняні, бавовняні, шовкові); штучні органічні (лавсан, нітрон, капрон, хлорин і ін.); природні мінеральні (азбест); штучні неорганічні (склотканина, металотканина). Дані про властивості волокон наведені в табл. 15.2.

В основі вибору матеріалу фільтрувальної перегородки лежать наступні показники: термостійкість, хімічна стійкість, повітропроникність, розривне навантаження, стійкість до згину, а також можливий ступінь очищення.

Бавовняне волокно на 94...95% складається з целюлози, воно гігроскопічне. При відносній вологості повітря 65% це волокно поглинає до 8% вологи, при вологості 93...94% – 25% вологи. При нагріванні до 120...130°C помітних наслідків не спостерігається, при вищій температурі відбувається руйнування волокна. Слабкі розчини їдкого лугу (0,5...5%-ві) не роблять істотного впливу на бавовняне волокно, при сильніших розчинах відбувається його руйнування. Багато кислот діють на бавовняне волокно руйнуючи. Так, 1,5%-ва соляна кислота при температурі 90...100°C руйнує волокно протягом 1 год. Так само діють азотна і сірчана кислоти.

У *шерстяних волокнах* міститься 90% каротину. При нагріванні понад 170°C вони руйнуються. На відміну від бавовняного волокна шерстяні волокна менш стійкі до кислот і стійкіші до лугів. Шерстяне волокно при вологості повітря 65% інтенсивно поглинає до 15,5% вологи, при вологості 100% – 34% вологи. На шерстяну тканину руйнуюче діє вода температурою понад 70°C і сірчана, соляна, азотна кислоти концентрацією розчину більше 5...7%. При дії повітря температурою 80°C шерсть стає жорсткою і ломкою. Механічна міцність шерстяного волокна нижча, ніж бавовняного, проте шерстяні волокна придатніші для виготовлення фільтрувальних тканин завдяки більшій пружності.

Значними перевагами володіють фільтрувальні тканини з *нітрону* і *лавсану*. Нітронове волокно характеризується міцністю, еластичністю, малою гігроскопічністю. При вологості повітря 65% воно поглинає з повітря лише 1% вологи. Нітрон необмежено довго без помітних наслідків витримує температуру 120...130°C і обмежений час 180°C. В порівнянні з бавовною нітрон у декілька разів стійкіший до кислот, органічних розчинників. Він стійкий також до дії мікроорганізмів, молі. Тканина з нітрону не піддається усадці.

Лавсанове волокно володіє міцністю, стійкістю до стирання і температури приблизно такими ж, як нітронове волокно, проте стійкіше до хімічних реагентів. Лавсанове волокно володіє малою гігроскопічністю, стійке до дії мікроорганізмів.

Таблиця 15.2

Основні властивості текстильних волокон, що використовуються для фільтрувальних тканин

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

Умовні позначення: ДХ – дуже хороша; Х – хороша; З – задовільна; П – погана; ДП – Дуже погана

Основна властивість *волокон азбесту*: володіють високою термостійкістю, не загнивають, стійкі по відношенню до розчинів лугів і кислот. Міцність невелика.

Скляне волокно володіє високою термостійкістю, хімічною стійкістю, витримує значні розривні навантаження. Склотканина стійка при температурі до 150...300°C. Фільтрувальна склотканина зазвичай виготовляється з волокон діаметром 6...8 мкм. Склотканини апретують – покривають кремнійорганічною сполукою – силіконом і графітують. Завдяки цьому термін служби склотканини підвищується.

Фільтрувальні матеріали можуть бути тканими і нетканими, а залежно від стану поверхні – ворсованими і гладкими.

При виготовленні нетканих матеріалів з синтетичних волокон зчеплення цих волокон підсилюють, пробиваючи шар волокон спеціальними голками і отримуючи, таким чином, голкопробивні матеріали. Для цих же цілей використовують склеюючі добавки і ін.

Опір незапилених фільтрувальних тканин при навантаженнях по газу (повітрю) 0,3...2 м³/м²·хв зазвичай знаходиться в межах 5...40 Па.

Термін служби фільтрувальних тканин залежно від умов експлуатації (вид пилу, її концентрація, температура, рівень експлуатації і ін.) може складати від декількох місяців до декількох років.

Питоме повітряне навантаження тканини (швидкість фільтрації), м³/м²·год приймають залежно від концентрації пилу в повітрі (газі), що очищається, виду тканини (табл. 15.3).

Таблиця 15.3

Рекомендовані навантаження на фільтрувальні тканини, м³/(м²·год)

Тканина	Початкова запиленість повітря (в г/м ³) до			
	1	5	10	20
Фільтр-сукно №2	1	2	3	4
Сукно ЧШ, тканина ЦМ, нітрон, лавсан, бавовнянобумажна	120-150	80-100	60-70	40-50.
Склотканина апретирована	60-90	50-60	40-50	30-50
Фільтр-сукно №2	5	6	7	8
Сукно ЧШ, тканина ЦМ, нітрон, лавсан, бавовнянобумажна	70-90	50-70	40-50	30-40
Склотканина апретирована	50-60	40-50	30-50	30-40

Примітка. Дані перших чотирьох граф відносяться до крупнодисперсного пилу 2-ої і 3-ої груп, останніх чотири, – до дрібнодисперсного і дуже дрібнодисперсного пилу 4-ої і 5-ої груп.

Багато тканин виготовляють у вигляді полотен (шматків), з яких шиють рукави. Діаметр рукавів зазвичай в межах 90...450 мм. Довжина 2,5...10 м. Відношення довжини рукава до його діаметру 15...20.

Величини повітропроникності характеризують аеродинамічні властивості тканин в незапиленому стані. В міру запилення опір тканини починає рости. Якщо не приймати ніяких мерів, воно може збільшуватися до величини натиску, що розвивається вентилятором. Подальше накопичення пилу приведе до зменшення подачі вентилятора. Частина пилу при підвищених перепадах тиску може проникнути в пори між нитками і “забити” тканину, зробивши її непридатною для фільтрування. Щоб уникнути цього явища фільтри через певний час експлуатації піддають регенерації. Процес регенерації є невід’ємною частиною технології фільтрації і розробляється в проекті разом з іншими параметрами фільтрації.

15.2.2. Рукавні фільтри

Конструктивно гнучка фільтрувальна перегородка виконується у вигляді рукава, тому і фільтри з гнучкими фільтрувальними перегородками отримали назву “рукавні”.

У нормально працюючих рукавних фільтрах концентрація пилу на виході з апарату зазвичай не перевищує 20 мг/м^3 . При використанні вискоєфективних фільтрувальних матеріалів і вловлюванні волокнистого пилу концентрація на виході може знижуватися до 1 мг/м^3 і менш.

Загальний вид рукавного фільтра показаний на рис. 15.4.

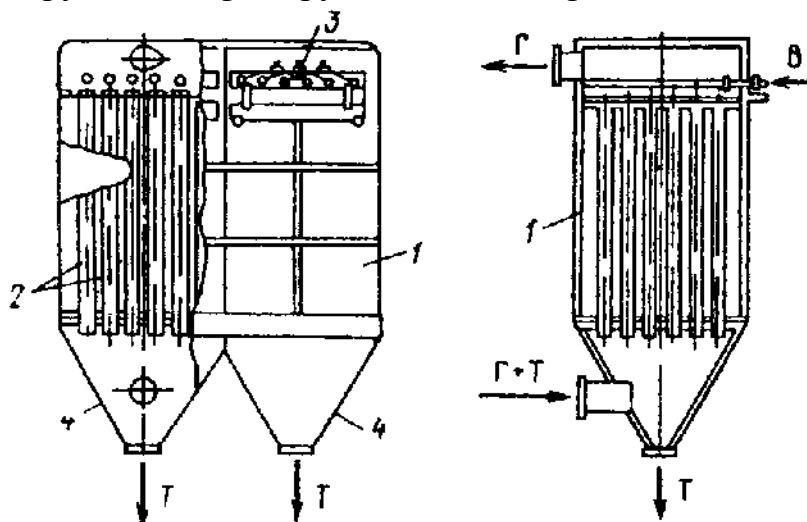


Рис. 15.4. Рукавний фільтр: 1 – корпус; 2 – фільтрувальні рукави; 3 – колектор стислого повітря; 4 – пилосбірник

Регенерація фільтрувальної тканини рукавів проводиться шляхом механічної або аеродинамічної дії на фільтрувальну тканину з метою руйнування і видалення шару осівшого пилу.

При виборі способу регенерації мають значення вид тканини, конструкція апарату, характеристики пилу і технологічного процесу, інші чинники.

Механічне струшування може виконуватися декількома способами. Нестійкі на згин тканини (наприклад, зі скловолокна) регенерують швидким похитуванням з одного боку в інший без зміни натягнення. Фільтри з еластичніших і нетовстих тканин можна обтрушувати, додаючи матеріалу хвилеподібні коливання. Широко використовувані для обробки газових викидів рукавні фільтри (апарати з вертикальними фільтрувальними елементами у вигляді тканинних рукавів) струшують хвилеподібною зміною натягнення тканини, піднімаючи і опускаючи вверх рукава. Більшість струшуючих пристроїв забезпечуються електроприводом. Іноді струшування комбінують з продуванням тканин.

В ряді рукавних фільтрів регенерація фільтрувальної тканини здійснюється шляхом зворотного струменевого і імпульсного продування рукавів.

Зворотним продуванням регенерують тканини при вловлюванні пилу, який легко скинути. Для цього змінюють напрям дуття, подаючи на регенерацію свіже або очищене повітря. Надають переваги останньому варіанту, оскільки не збільшується кількість повітря в системі. Для виконання зворотного продування

фільтр може відключатися посекційно або повністю. Витрату повітря на зворотне продування приймають до 10% від кількості газу, що очищається.

При відкладеннях пилу на внутрішній поверхні рукавів здійснюють струменеве продування, подаючи повітря з щілини кільцевої трубки-каретки, що одягається на рукав і поволі рухомою вздовж нього (рис. 15.5). В порожнину кільця подається повітря від високонапірного вентилятора або повітродувки по гнучкому шлангу. Повітря закінчується з кільця через щілину. Шар осівшого пилу руйнується в результаті дії на нього кільця, що переміщається, і видування пилу струменем повітря, витікаючим з кільця із швидкістю 10...30 м/с. Пил падає в бункер.

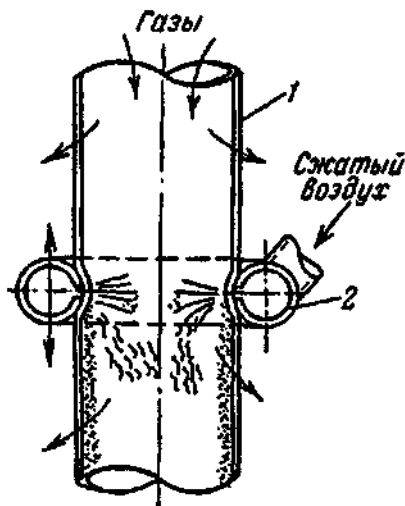


Рис. 15.5. Схема зворотного струменевого продування рукавного фільтру: 1 – рукав; 2 – кільце з щілиною і патрубком для підведення стислого повітря

Це найбільш потужний спосіб регенерації, що дозволяє видути навіть частинки пилу, що застрягли в просторі між нитками. Тому фільтри, обладнані каретками струменевого продування, можуть працювати з підвищеними навантаженнями і перепадами тиску. Недоліки струменевого продування полягають в складності пристрою переміщення каретки і стиранні нею товстих фільтрувальних матеріалів: повсті, фетру, для якого в основному струменеве продування і використовується.

Інший різновид видування пилу – імпульсна регенерація – використовується в рукавних фільтрах при схемі подачі забрудненого повітря ззовні всередину рукава і відкладеннях пилу на його зовнішній поверхні (рис. 15.6). При імпульсному продуванні струмінь стислого повітря, витікаючий з сопла розподільної труби, підсмоктує очищений газ (повітря) і поступає в рукав. Під впливом надмірного тиску рукав роздувається, відбувається руйнування шару осівшого пилу і його випадання в бункер.

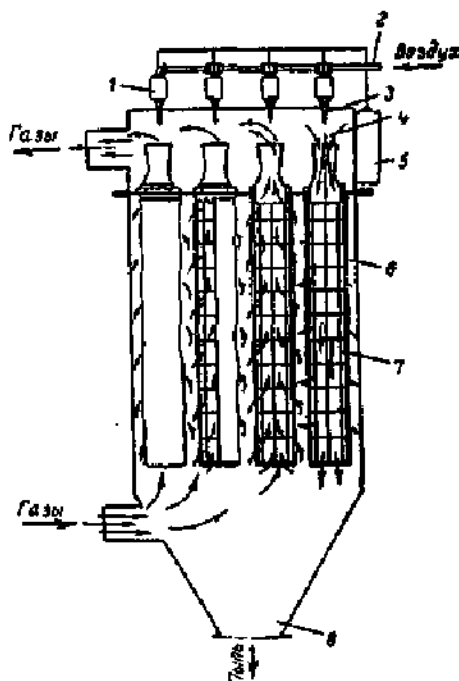


Рис. 15.6. Каркасный рукавный фільтр з імпульсним продуванням: 1 – соленоїдний клапан; 2 – труба для введення стислого повітря; 3 – сопло; 4 – струмінь стислого повітря; 5 – прилад автоматичного управління регенерацією; 6 – рукав; 7 – каркас; 8 – бункер

Окрім ефекту продування пульсуючий потік надає і механічну струшуючу дію. Імпульсну регенерацію виконують без відключення секцій. Щоб не відбувалося дуже інтенсивної регенерації з видаленням залишкової рівноважної кількості пилу (що приведе до великої величини проскакування в початковий період роботи фільтру після регенерації), варіюють тиск стислого повітря, тривалість і частоту імпульсів. Тривалість імпульсу 0,1...0,2 с, частота – 10 імпульсів в хвилину, тиск стислого повітря 500...600 кПа. Витрата стислого повітря складає 0,1...0,2% від кількості очищеного газу (повітря).

Типовим рукавним фільтром з механічною регенерацією і зворотним продуванням є Г4-БФМ (ФВ). Виготовляються чотири типорозміри фільтру ФВ: ФВ-30, ФВ-45, ФВ-60, ФВ-90. Фільтрувальна поверхня відповідно 30, 45, 60, 90 м².

Технічні дані фільтру Г4-БФМ приведені в табл. 15.4. Фільтр зображений на рис. 15.7.

Металева шафа фільтру розділена перегородками на секції з фільтрувальною поверхнею кожної 15 м². Таким чином, фільтри ФВ-30, ФВ-45, ФВ-60, ФВ-90 мають відповідно дві, три, чотири і шість секцій. У кожній секції розташовано 18 рукавів з фільтрувальної тканини (3х6 рядів). Рукави підвішені до рами струшуючого пристрою.

У фільтрі передбачена регенерація рукавів через 3,5 хв тривалістю 30 с. Регенерація здійснюється струшуванням і зворотним продуванням і проводиться посеційно.

Таблица 15.4

Характеристика фільтрів ФВ (Г4-1БФМ)

Показники	ФВ-30	ФВ-45	ФВ-60	ФВ-90
Поверхня фільтрувальної тканини, м ²	30	45	60	90

Число секцій	2	3	4	9
Число рукавів	36	54	72	108
Матеріал рукавів	Сукно фільтровальное № 2, нітрон, лавсан НФМ			
Розміри рукавів, мм:				
діаметр	135			
довжина	2090			
Опір фільтру, Па, не більше	450			
Період між струшуванням секцій, хв	3-4			
Потужність електродвигуна, кВт	0,6			1,1
Частота обертання, об/хв	1350			1400
Маса, кг	900	1210	1460	2000

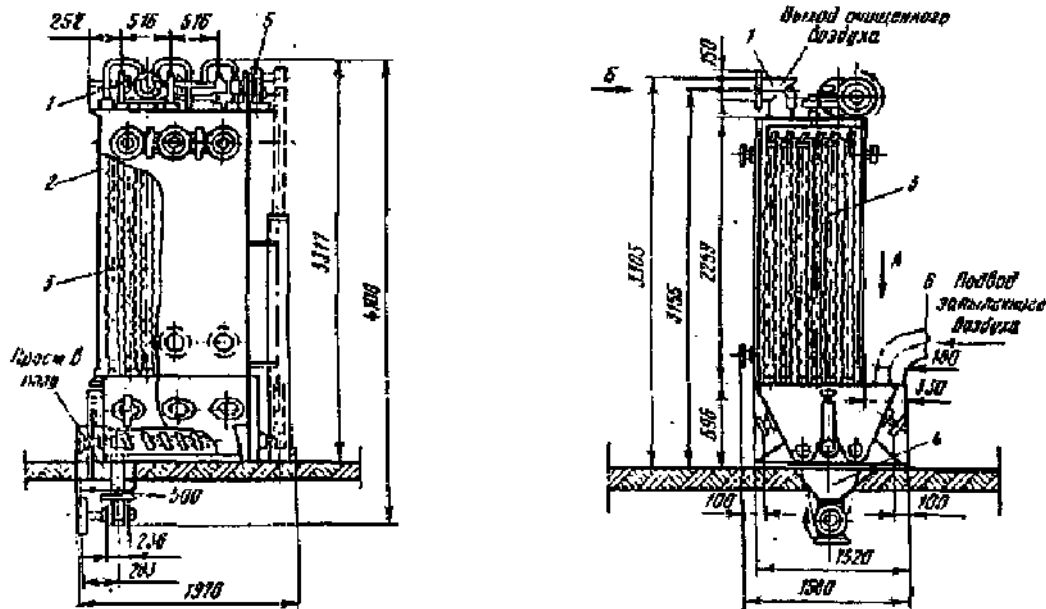


Рис. 15.7. Рукавний фільтр всмоктуючого типу ФВ (Г4-1БФМ): 1 – клапанні коробки для виходу повітря; 2 – шафа металева; 3 – рукави; 4 – пилозбірник; 5 – електродвигун; 6 – вхідний патрубок

Під час регенерації за допомогою важільно-кулачкового механізму закривається клапан, встановлений на виході очищеного повітря, і відкривається клапан на вході продувального повітря ззовні. Зовнішнє повітря поступає в регеновану секцію і проходить тканину в напрямі, зворотному робочому. При цьому шар осівшого пилу на внутрішній поверхні тканини, обпадає. Одночасно з допомогою важільно-кулачкового механізму відбувається струшування рукавів. В результаті продування і струшування пил, що осів на рукавах, падає в бункер, з якого віддаляється шнеком.

Потім регенована секція включається в роботу і починається регенерація наступної секції і так далі.

В даний час випускається і експлуатується безліч різноманітних конструкцій тканинних фільтрів. За формою фільтрувальних елементів і тканин вони можуть бути рукавні і плоскі (полотняні), за видом опорних пристроїв – каркасні, рамні і так далі, за наявністю корпусу і його форми – циліндричні, прямокутні, відкриті (безкамерні), за числом секцій – одно- і багатосекційні. Фільтри можуть також розрізнятися за способом регенерації і рядом інших ознак. Однозначних або науково

обґрунтованих критеріїв вибору типу фільтру серед цього різноманіття конструкцій немає. Рекомендується, по можливості, використовувати фільтри, розроблені для відповідних галузей промисловості.

Короткі відомості про характеристики вітчизняних конструкцій рукавних фільтрів, приведені далі в тексті і таблиці 15.5, можуть надати певну допомогу в орієнтації серед множини типів апаратів і бути корисними як первинна інформація.

Фільтри ФР-6П, ФТ-2М, ФТНС-М призначені для очищення аспіраційного повітря від волокнистого пилу текстильних і інших підприємств легкої промисловості. Регенерація рукавів проводиться за допомогою струшування ручним або механізованим способами. Питомі газові навантаження для фільтрів ФР-6П, ФТ-2М і ФТНС-М складають 0,056, 0,1 і 0,057 м³/м²·с) відповідно.

У хімічній і нафтохімічній технології найбільшого поширення набули рукавні фільтри наступних типів: ФРКІ, ФРКДІ, ФРО, ФРУ, ФР, ГЧ-БФМ, ФРОС. Кожен з типів має, як правило, декілька типорозмірів. З вказаної серії можна підібрати фільтр з поверхнею фільтрування від декількох квадратних метрів до декількох тисяч квадратних метрів, здатних працювати при температурах від декількох десятків градусів до 500°C.

Фільтр ЦА-3804 призначений для вловлювання азбестового пилу. Регенерація рукавів проводиться механічним струшуванням.

Фільтри ФРУ розроблені для систем аспірації вибухонебезпечних хімічних виробництв, ФРВ-20 і ФРН-30 – для різних технологічних процесів хімічних виробництв, ФР-250 – для аспіраційних систем сажових виробництв і підприємств по виробництву мінеральних добрив; СМЦ – для технологічних процесів підприємств будматеріалів; РФГ і УРФМ – для підприємств кольорової металургії; Г4-БФМ (раніше – ФВ) – для підприємств харчової промисловості. Регенерація проводиться механічним струшуванням і одночасним зворотним посекційним продуванням. Привід систем струшування електромеханічний, за винятком фільтрів УРФМ з пневмоприводом. Питомі газові навантаження для фільтрів ФРУ складають: 0,02 м³/м²·с, УРФМ – 0,012...0,02 м³/м²·с, Г4-БФМ – 0,025...0,033 м³/м²·с.

Фільтри ФР-518, ФР-650, ФР-5000, ФРДО-6500 з склотканиною використовуються для очищення вибухонебезпечних газових сумішей з температурою до 240°C від сажі. Їх регенерацію здійснюють зворотним посекційним продуванням. Питоме навантаження для фільтрів ФР-518 і ФР-650 складає (0,004...0,005) м³/м²·с, для фільтру ФР-5000 – 0,005...0,006 м³/м²·с.

Фільтри ФРО мають пропускну спроможність більше 14 м³/с і 3 типорозміри. Фільтри споряджаються лавсановим матеріалом або склотканиною і призначені для вловлювання пилу і перегонів з газових викидів металургійних і машинобудівних підприємств при температурах до 230°C. Регенерація здійснюється зворотним продуванням. Питоме навантаження для лавсанової тканини 0,008...0,015 м³/м²·с, для склотканини 0,005...0,008 м³/м²·с.

Фільтри типу РФОСП, РФСП-І, РФСП-1580 розроблені для вловлювання перегонів свинцю і інших важких металів на підприємствах кольорової металургії при концентрації забруднювачів на вході близько 500...1000 мг/м³. Кінцеві концентрації знаходяться в межах декількох мг/м³. Фільтри споряджаються двошаровим лавсаном, обладнані системою струменевого продування і працюють з

питомими навантаженнями до $0,08 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$ для тонкого і $0,15 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$ для грубого пилю.

Фільтри загального призначення типу ФРКІ розроблені НІОГаз. Регенерація фільтрувальної тканини проводиться без відключення секцій фільтру імпульсною верхньою подачею всередину рукавів стислого повітря з тиском 0,3 або 0,6 МПа. Фільтрувальний матеріал – лавсан або повсть з синтетичних волокон. Питоме газове навантаження для фільтрів ФРКІ складає $0,03 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$. Фільтри ФРКН-В і ФРКН-Н-В, призначені для вловлювання пилю, що електризується, мають такі ж характеристики, як і фільтри ФРКІ відповідних типорозмірів. Фільтри ФРКДІ відрізняються від фільтрів ФРКІ більшою довжиною рукавів. Тому в них передбачено двостороннє імпульсне продування з установкою додаткових сопел для подачі стислого повітря в нижній частині кожного рукава. Питоме газове навантаження для фільтрів ФРДКІ складає $0,027 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$.

Таблиця 15.5

Технічні характеристики рукавних фільтрів

Марка фільтру	Площа фільтрувальної поверхні, м^2	Кількість секцій, шт.	Кількість рукавів в секції, шт.	Діаметр рукава, мм	Висота рукава, м	Пропускна спроможність, $\text{м}^3/\text{с}$ / опір, Па
ФР-6П	18	1	6	390	2,5	1/500... 1000
ФТ-2М	20	1	12	300	1,8	2,5/600
ФТНС-4М	12,4	1	4	386	2,6	-/490
ФТНС-8М	24,8	2	4	386	2,0	-/490
ФТНС-12М	37,2	3	4	386	2,6	-/490
ЦА-3804	4140	3				5,6/-
ФРУ	2,5...50	1...4	14; 28; 42; 56	125	0,9; 1; 2; 2,5	/1500
ФРВ-20	20	2	32	130	1,63	
ФРН-30	30	2	48	130	1,63	-
ФР-250	281	4	288	135	2,3	-/1000...2000
СМЦ-101А	50;55;110; 115;205	2	36	200	9;5,1;9,1	-/1900
РФГ	112;168; 224;280	4;6;8;10	56;84;112; 140	220	3,1	-
УРФМ	1610;2300	14;20	588;840	220	4,063	-/700...1500
Г4-1БФМ	30;45;60; 90	2;3;4;6	36;54;72;108	135	2,09	-/1300
Г4-2БФМ	60;90	4;6	72;108	135	2,09	-/1300
ФР-518 (650)	518 (650)	6	72 (90)	127	3	2,5...3,33/1600
ФР-5000	5000	8	504	127	3,09	-/1500...2000
ФРДО-6500	6500	10	212	130	7,85	
ФРО-2400-1	2400	8	42	200	8	>14/2000
ФРО-6000-2	6000	10	54	300	10	>14/2000
ФРО-20300-3	20300	10	216	300	10	>14/2000
РФОСП	1,9...136		2...24		1...6	0,17...11,4/2000
РФСП-П	370	4	22	300	4,8	
РФСП-1580	1580	20	24			до 130/-
ФРКІ-30	30	1	36	135	2	-/2000
ФРКН-В-30	30	1	36	135	2	-/2000
ФРКІ-60	60	2	36	135	2	-/2000
ФРКН-В-60	60	2	36	135	2	-/2000
ФРК-90	90	3	36	135	2	-/2000
ФРКН-В-90	90	3	36	135	2	-/2000
ФРКІ-180	180	4	36	135	3	-/2000
ФРКІ-360	360	8	36	135	3	-/2000
ФРКДІ-550	550	6	36	135	6	-/2800
ФРКДІ	720	8	36	135	6	-/2800
ФРКДІ-1100	1100	12	36	135	6	-/2800

15.3. Зернисті фільтри

Зернисті фільтри використовують в газоочистці при неможливості застосування тканинних через високу температуру середовища. Зернисті фільтри знаходять все більш широке застосування в світі при обробці запиленних викидів виробництва будівельних матеріалів, підприємств хімічної промисловості, при отриманні рідкісних металів і в інших технологічних процесах. Проте в порівнянні з тканинними фільтрами вони мають менше розповсюдження. Перспективним напрямом можна вважати використання зернистих фільтрів для одночасного вловлювання дисперсних і газоподібних домішок газових викидів.

Фільтрувальний шар в зернистих фільтрах утворений зернами сферичної або іншої форми. Можуть використовуватися при високих температурах – до 500...800°C, в умовах дії агресивного середовища. Зернисті фільтри поширені значно менше, ніж тканинні фільтри. Розрізняють насипні зернисті фільтри, в яких елементи фільтрувального шару не зв'язані жорстко один з одним, і жорсткі зернисті фільтри, в яких ці елементи міцно зв'язані між собою шляхом спікання, пресування, склеювання і утворюють міцну нерухому систему.

Зернисті жорсткі фільтри керамічні, металокерамічні та інші володіють значною стійкістю до високої температури, корозії, механічних навантажень. Їх недолік – висока вартість, великий гідравлічний опір, трудність регенерації.

У насадці насипних фільтрів використовують пісок, гравій, шлак, роздроблені гірські породи, кокс, крихту гуми, пластмас, графіту і інші матеріали залежно від необхідної стійкості до дії температури, хімічних речовин.

Як і тканинні фільтри, зернисті насипні фільтри потребують регенерації. Найбільшого поширення набули наступні способи очищення фільтрувального шару: імпульсним продуванням з періодичним рухом шару; зворотним продуванням і ворушінням (спушенням); зворотним продуванням і віброструшуванням; видаленням лобового шару зерен.

Регенерація здійснюється шляхом спушення шару вручну або механічно, промивки водою, заміни шару.

Зернистий фільтр може бути єдиним ступенем в установці або першим ступенем перед ефективнішим фільтром, наприклад з матеріалами ФП.

У зернистому гравієвому фільтрі для вловлювання пилу з наявністю абразивних частинок і агресивних газів від дробарок, грохотів, сушарок, млинів, транспортуючих пристроїв підприємств по виробництву цементу, вапна, гіпсу, фосфорних добрив і ін. питоме навантаження на фільтр складає 17...50 м³/м³·год, опір фільтру – в межах 0,5...1,5 кПа. Ефективність очищення – до 99,8%.

Характеристики деяких типів фільтрів із зернистим шаром, що знайшли застосування в промисловості, приведені в таблицях 15.6, 15.7.

Таблиця 15.6

Технічні характеристики зернистих фільтрів типу ЗФ

Показники	ЗФ-4М	ЗФ-5М	ЗФ-6М	ЗФ-8	ЗФ-10
Пропускна спроможність, м/с	2,5...5	5...10	10...40	10...150	10...30
Площа фільтрації, м	2...4	4...8	8...31	8...120	16...37
Число секцій	2...4	2...6	2...8	2...30	6...37
Число фільтрувальних шарів	3	3	3	3	2
Тривалість фільтрації / регенерації, хв	40...60 2...4	40...60 2...4	40...60 2...4	40...60 2...4	10...15 0,5...1

Максимальна початкова запиленість, г/м	20	20	20	20	5
Наповнювач	Гравій розміром 3...10 мм				
Максимальна температура, К	673				
Гідравлічний опір, Па	600...1500				
Ступінь очищення, %	95...99				
Маса, т:					
з наповнювачем	2,5...5	4,5...9	9...14	14...180	15...34
без наповнювача	1,5...3	2,5...5	5...10	10...130	10...20
Спосіб регенерації	Зворотне продування				

Таблиця 15.7

Технічна характеристика гравієвих фільтрів циклонів типу ФГЦН

Показники	ФГЦН-120	ФГЦН-30
Площа фільтрувальної поверхні, м	124	28,8
Питоме навантаження, м ³ /(м ² ·с)	0,25...0,33	
Гідравлічний опір, Па	1800...2200	1600...2000
Максимальна температура, К	673	
Наповнювач	Гравій великою 2...4 мм	
Максимальна початкова запиленість, г/м	30	
Число елементів в апараті	10	4
Діаметр фільтрувального елементу, мм	2600	2160
Тип циклону	ЦН-15У	ЦН-24
Діаметр циклону, мм	1200	800
Спосіб регенерації	Ворушіння із зворотним продуванням	
Привід механізму ворущіння	МП02-26ВК5,5/5,6	МП02-18ВК6/7
Число обертів перетрушувача, хв ⁻¹	5,6	6,7
Габарити, мм:		
довжина	15300	5930
ширина	7570	4440
висота	11900	8700
Маса, т	68	20

15.4. Розрахунок і вибір газових фільтрів

Технологічні розрахунки фільтрів зводяться до визначення площі фільтрувальної перегородки, гідравлічного опору фільтрувальної перегородки і апарату в цілому, частоти і тривалість циклів регенерації елементів, що фільтрують.

При виборі конструкції фільтру з гнучкою фільтрувальною перегородкою доводиться враховувати значне число чинників:

- характеристику газів, що очищаються, на вході у фільтр: середня об'ємна витрата газів, що очищаються, в робочих і нормальних умовах, склад газів і їх вибухонебезпека, температура і тиск, допустимість підсосу, вміст вологи, точка роси;

- властивості пилу: тип пилу, розподіл частинок по розмірах, середня і максимальна масова концентрації, вміст токсичних речовин, хімічний склад пилу, її гігроскопічність і розчинність у воді, схильність до злипання, вибуховість і горючість, дійсна і насипна щільність, електризованість, абразивність, гранично допустима концентрація;

- характеристику джерела виділення пилу: технологічні відомості про процес і устаткування, що використовується, періодичність або безперервність процесу, місце відсмоктування запиленних газів, конструкційні матеріали, використовувані в технологічному устаткуванні;

- характеристики і вимоги до вловленого пилю: його цінність, можливість регенерації і повернення у виробництво, можливість його використання в інших виробництвах, спосіб вивантаження, транспортування і упаковки;

- основні вимоги до фільтрів: опір фільтру, що допускається, величина вихідної концентрації, що задається, розмір установки, необхідна площа, місце розташування, необхідне допоміжне устаткування, кліматичні умови, ліміти на воду, пару, електроенергію, можливість проведення процесу при аварійній зупинці фільтру, капітальні і експлуатаційні витрати.

З урахуванням фізико-хімічних характеристик викидів, характеру виробництва, техніко-економічних і інших чинників обґрунтовують ефективність очищення газів за допомогою фільтрації, приймають тип фільтрувального середовища і фільтру (волокнистий, тканинний, зернистий і ін.), підбирають прийнятний матеріал волокон, тканини або гранул; для тканих і зернистих фільтрів визначають також спосіб регенерації фільтрувального шару.

Поверхня апарату, що фільтрує, визначається з виразу

$$P\phi = [(D_0 + V_P)/60d] + P_P \quad (5-1)$$

де V_N - об'єм газу, що поступає на очищення, м³/ч; V_P - об'єм газу або повітря, що витрачається на регенерацію тканини, м³/ч;

q - питома газова навантаження фільтрувальної перегородки при фільтруванні, м³/(м²·мин);

F_P - поверхня, що фільтрує, відключається на регенерацію протягом 1 год, м². Величину F слід розраховувати із залежності:

$$F = V_D \cdot t / 3600, \quad (5.2)$$

де N_c - число секцій у фільтрі;

F_c - поверхня секції, що фільтрує

м²; t_P - час регенерації секції, з;

TP - число регенерації протягом 1 год.

Для фільтрів з імпульсним продуванням у зв'язку з короткочасністю процесу регенерації поверхні фільтру, регенерації, що вимикається на якийсь час, і об'ємом газу, що витрачається на зворотне продування, можна нехтувати.

Питома газова навантаження на фільтрувальну перегородку для рукавних фільтрів коливається від 0,3 до 6 м³/(м²·хв). Всередині цього діапазону вибір оптимального значення залежить від багатьох чинників, до яких в першу чергу відносяться властивості вловлюваного пилю, спосіб регенерації фільтрувальних елементів, концентрація пилю в газі, структура фільтрувального матеріалу, температура газу, що очищається, необхідний ступінь очищення.

З достатньою для практичних розрахунків точністю питома газова навантаження в рукавних фільтрах можна визначити з наступного виразу [м³/(м²·хв)]:

$$q = 4, \cdot C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 \quad (5.3)$$

де q_N - нормативна питома навантаження, залежне від виду пилю і його схильності до агломерації (визначається за даними, що наведені нижче);

C_1 - коефіцієнт, що характеризує особливість регенерації елементів, що фільтрують;

C_2 - коефіцієнт, що враховує вплив концентрації пилю на питома газове навантаження (визначається по мал. 5.8);

c_3 - коефіцієнт, що враховує вплив дисперсного складу пилу в газі (визначається по даним, приведеним нижче);

c_4 - коефіцієнт, що враховує вплив температури газу (визначається по даним, приведеним нижче);

c_5 - коефіцієнт, що враховує вимоги до якості очищення.

Значення нормативного питомого газового навантаження (qH в $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$) для різних матеріалів приведені нижче:

$\text{Ч}_n = 3 \dots 5$: комбикорм, мука, зерноопилки, жмыховая смесь, пыль кожи, табак, картонная пыль, поливинилхлорид после распы шительной сушилки;	-, --	асбест, волокнистые материалы, пыль п] форм, гипс, извс полировки, соль, руйных аппарате ванная сода;	$\text{Ч}_n = 2, 6$ тые целлюлозные мази выбивке отливок из ;сть гашеная, пыль от песок, пыль пескост->в, тальк, кальциниро-
глинозем, цемент, керамические красители, уголь, плавиковый шпат, резина, каолин, известняк, сахар, пыль горных пород;	КОКС , Л(таллопо металло красите] крахмал химика! рья;	$\text{Ч}_n = 1$ зтучая зола, ме-рошки, окислы в, пластмассы, 1и, силикаты, , смолы сухие, ы из нефтесы-	$\text{Ч}_n = 1$ активированный уголь, технический углерод, моющие средства, порошковое молоко, возгоны цветных и черных металлов.

Для коефіцієнта, що враховує вплив особливостей регенерації фільтрувальних елементів, як базовий варіант приймається фільтр з імпульсним продуванням стислим повітрям з рукавами з тканини. Для цього апарату коефіцієнт $c_x = 1$. При використанні рукавів з нетканих матеріалів значення коефіцієнта може збільшуватися на 5...10%. Для фільтрів з регенерацією шляхом зворотного продування і одночасного струшування або похитування рукавів приймається коефіцієнт $c_x = 0,70 \dots 0,85$. Менше значення приймається для щільнішої тканини. При регенерації шляхом тільки зворотного продування $c_x = 0,55 \dots 0,70$.

У теорії фільтрації прийнято оперувати з величиною, зворотної за сенсом ефективності очищення – проскакуванням. У практиці проектування установок фільтрації ступінь очищення не обчислюють, а приймають за інформацією, що приводиться в каталогах заводів-виготовачів. Цю величину також слід розглядати як оцінку. При експлуатації фільтру величина проскакування не залишається постійною в часі. У циклі між регенераціями проскакування падає від максимального до мінімального значення у міру накопичення пилу на фільтрі. В цілому за період експлуатації тканинного фільтру проскакування тривалий час (декілька тисяч циклів) знижується внаслідок збільшення залишкової запиленої тканини, а потім, протримавшись якийсь час на мінімальному рівні, починає рости унаслідок зносу матеріалу.

Концентрація пилу (коефіцієнт c_g) позначається на тривалості циклу фільтрування. При збільшенні концентрації збільшується частота регенерації і питоме навантаження повинно знижуватися. Проте залежність питомого навантаження від концентрації пилу не є лінійною функцією. Найпомітніше зміна концентрації проявляє себе в інтервалі концентрацій 1...30 г/м (див. рис. 5.8). При вищих значеннях посилюється вплив коагуляції частинок пилу, і частина її у вигляді агломератів падає в бункер до її осадження на фільтрувальних елементах.

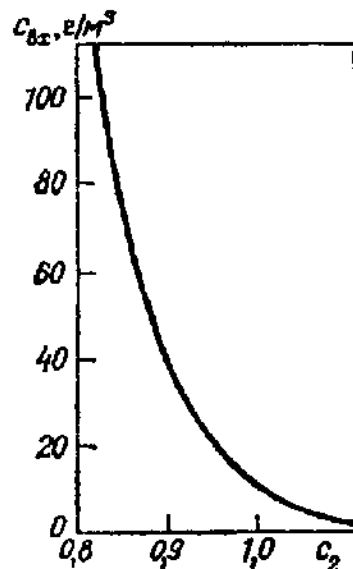


Рис. 5.8. Залежність коефіцієнта c_2 від концентрації пилу на вході у фільтр ст

Значення коефіцієнта c_3 , що враховує вплив дисперсного складу пилу, приведені нижче (d_m - медіанний розмір частинок):

Таблиця 5.8.

Залежність коефіцієнта c_3 від діаметру частинок

d_m , мкм	<3	3-10	10-50	50-100	>100
	0,7-0,9	0,9	1,0	1Д	1,2-1,4

Значення коефіцієнта c_4 , що враховує вплив температури газу, приведені нижче:

Таблиця 5.9.

Залежність коефіцієнта c_4 від температури газу

$t, ^\circ\text{C}$	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

Коефіцієнт c_5 , що враховує вимоги до якості очищення, оцінюється по концентрації пилу в очищеному газі. При концентрації пилу в газах, що відходять, 30 міліграм/м $c_5 = 1$, а при 10 міліграмі/м - $c_5 = 0,95$.

Енергетичні витрати і ефективність процесу очищення безпосередньо залежать від опору, що створюється шаром, що фільтрує, тобто тканиною і автошаром (шаром пилу, що осів на тканині в процесі фільтрації). Складову опору, залежну від структури тканини, називають залишковим опором тканини, припускаючи, що в порах тканини після регенерації залишається певна (так зване "рівноважне") кількість пилу. Проте на величину залишку окрім способу регенерації впливає безліч інших причин. Тому залишковий опір після регенерацій може змінюватися в достатньо широких межах.

При підборі рукавних фільтрів важливою є оцінка очікуваного гідравлічного опору, що визначає енергетичні витрати на фільтрування. Гідравлічний опір фільтру в Па складається з опору корпусу $A_{рк}$ і опору фільтрувальної перегородки $APП$.

$$(5.4)$$

$A_{рк}$ - опір корпусу.

Гідравлічний опір корпусу апарату визначається величиною місцевих опорів, що виникають на вході в апарат і виході з нього і при роздачі потоку по

фільтрувальних елементах. У загальному вигляді гідравлічний опір може бути оцінене коефіцієнтом опору корпусу апарату, віднесеним до швидкості газу у вхідному патрубку.

$$\xi = \frac{\Delta P}{\rho v^2} \quad (5-5)$$

де v - швидкість газу у вхідному патрубку, м/с.

Величина ξ при конструюванні фільтрів зазвичай приймається рівною 1,5... 2,0.

Гідравлічний опір фільтрувальної перегородки включає втрати натиску за рахунок самої перегородки ($\Delta P_{\text{пр}}$) і втрати за рахунок тієї, що осіла на перегородку пилу ($\Delta P_{\text{п}}$):

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пр}} + \Delta P_{\text{п}} \quad (5.6)$$

Величину $\Delta P_{\text{пр}}$ (у Па) зручно обчислювати по виразу:

$$\Delta P_{\text{пр}} = K_{\text{п}} M W^2 \quad (5.7)$$

де $K_{\text{п}}$ - коефіцієнт, що характеризує опір фільтрувальної перегородки, м²; M - динамічна в'язкість газу, Па-с; W - швидкість фільтрування, м/с; n - показник ступеня, залежний від режиму перебігу газу крізь перегородку (для ламинарного режиму $n = 1$, для турбулентного $n > 1$).

Коефіцієнт $K_{\text{п}}$ залежить від товщини і проникності фільтрувальної перегородки, кількості пилу, що залишився на перегородці після регенерації, властивостей пилу. Тому цей коефіцієнт визначають експериментально. Наприклад, для фільтрувальних тканин з лавсану, що уловлюють цементний або кварцевий пил з медіанним діаметром в межах 10...20 мкм, $K_{\text{п}} = (100...1500) \cdot 10^6$ м⁻¹, для тих же матеріалів при уловлюванні перегонів від сталеплавильних дугових печей з медіанним діаметром частинок 2,5...3,0 мкм $K_{\text{п}} = (2300...2400) \cdot 10^6$ м⁻¹. Для щільніших тканин (лавсан, склотканина) на тому ж пилі коефіцієнт $K_{\text{п}}$ збільшується в 1,2... 1,3 разу.

При уловлюванні пилу з медіанним розміром частинок менше 1 мкм коефіцієнт $K_{\text{п}}$ збільшується у декілька разів і для лавсану. При уловлюванні перегонів кремнію з медіанним діаметром 0,6 мкм він складає $(13000... 15\ 000) \cdot 10^6$ м⁻¹.

Приведені значення коефіцієнтів не враховують можливе збільшення його у присутності вологи.

Опір в Па, викликане пилом, що осів на перегородку, розраховується по рівнянню:

$$\Delta P_{\text{п}} = \xi \rho v^2 K_1 \quad (5.8)$$

де ***T*** - тривалість фільтрувального циклу, з; ***СВХ*** - концентрація пилу на вході у фільтр, кг/м³; ***Кх*** - параметр опору шаруючи пилу, м/кг.

Величина ***Кх*** залежить від властивостей пилу і порозности шаруючи пил на перегородці. Наприклад, для цементу з медіанним діаметром частинок ***dM=12...20*** мкм ***Кх = (6,5 — 16) • 10⁹ м/кг***, для частинок кремнію ***dM=0,7*** мкм

Кх = 330 10⁹ м/кг, для перегонів сталеплавильної дугової печі ***dM = 3*** мкм ***До = 80 10⁹ м/кг***.

Користуючись формулою (5.8), при відомому або заданому гідравлічному опорі шаруючи пил можна знайти тривалість фільтрувального циклу:

$$T = AP:/(VC(aw2K1)). \quad (5.9)$$

Слід мати на увазі, що загальний опір рукавних фільтрів не повинно перевищувати 2800 Па, а опір шаруючи пилу на перегородці -600...800 Па.

Орієнтовні значення коефіцієнтів очищення деяких видів викидів в рукавних фільтрах приведені в табл. 5.10.

Таблиця 5.10.

Ефективність очищення пилу в рукавних фільтрах

Процес виробництва або устаткування, що виділяє дисперсні забруднювачі	Вміст частинок менш 5 мкм, мг/м	Кінцева концентрація, %	Ступінь очищення %	Спосіб регенерації*	Питоме навантаження, м ³ /(м ² с)
Переробка алюмінієвої руди	-	3	-	В	0,041
Мідна руда: вантаження розвантаження подрібнення	30 67 2	13 18 6	98,15 86,47 99,75	В В	0,015 0,015
Переробка залізняку: розвантаження вагонеток вторинне і третинне дроблення транспорт тонкоиз-мельченной руди	-	3 3 4	99,69	-	-
Виробництво вапняку: первинне подрібнення сита первинного подрібнення транспортування	-	6 6 2	-	и и и	0,028 0,035 0,035
обдирання і молоткастий млин вторинне подрібнення сита вторинного подрібнення калібрувальне сито	-	2 4 1 2	99,84	В В И в	0,012 0,011 0,026 0,010
Переробка золотої руди, регенерація на складах	12...21	7	95,88	и	0,046
Дроблення польового шпату	-	5	99,92	о	0,015
Помел каоліну: млин Раймонда валковая млин	70 70	16 7	99,65 99,60	-	-
Стеклоплавильные печи: сода, известняк сода, свинец, боросиликат	-	11 9	72 94,80	о в/о	0,003 0,003
Виробництво скловолокна: боросиликатного содоизвестковоборосиликатного	-	15 59	-	в/о в/о	0,004 0,003
Приготування опок: водяний млин млин Раймонда	92	3 2	99,71 99,96	о о	0,026 0,030
Електроплавильна пекти	40...65	2	98,67...96,67	в	0,016

Промислові котельні	-	37	93,15	о	0,025
Опалювальні котельні: пилоподібне спалювання механічне шарове спалювання	23...65 5...60	2 4	99,92 99,80	о в/о	0,010 0,015
Мусоросжігачі	20...65	0,7	99,86	о	0,015

Примітка: У - струшування, І - імпульсний, Про - зворотне продування.

* $P_{\text{г}} = \sqrt{X/2} = 2(10,52)^{2-0,998/2} = 110$ Па і загальний гідравлічний опір фільтру

$Ar_{\text{ф}} = 110 + 1095 = 1205$ Па. =

Виходячи з витрати газу і загального опору установки $Ar_{\text{общ}} = Ar_{\text{п}} + Ar_{\text{ф}} = 1300 + 1205 = 2505$ Па по каталогу і технічним характеристикам вибираємо вентилятор високо-го тиску ВД-15,5 з номінальною витратою $VH = 60000$ м³/ч і $Ar_{\text{н}} = 3000$ Па.

Визначаємо потужність електродвигуна вентилятора:

$\Delta = \Delta AP_{\text{г}} / (3600 - 1000 \eta_{\text{лн}}) = 50000 \cdot 2505 / (3600 - 1000 \cdot 0,75 \cdot 0,92) = 50$ кВт. Існує і інша методика розрахунку рукавного фільтру. Розрахунок площі поверхні, що фільтрує, проводиться в наступному порядку.

1.3 урахуванням фізико-хімічних характеристик викидів, характеру виробництва, техніко-економічних і інших чинників обґрунтовують ефективність очищення газів за допомогою фільтрації, приймають тип середовища, що фільтрує, і фільтру (волокнистий, тканинний, зернистий і ін.), підбирають прийнятний матеріал волокон, тканини або гранул; для тканих і зернистих фільтрів визначають також спосіб регенерації шару, що фільтрує.

2. По загальній витраті запиленних газів V , м³/с, витраті газів $V_{\text{р}}$ на регенерацію, м³/с, і питомому навантаженню q м³/м²с), допустимою для вибраного типу фільтру, визначають робочу площу фільтрації:

$$F_{\text{т}} = (V + V_{\text{р}}) / q_{\text{р}} \quad (5.10)$$

Кількість газів на регенерацію $V_{\text{р}}$, приймають по технічних характеристиках вибраних фільтрів.

Значення допустимого питомого навантаження $q_{\text{тп}}$ (швидкості фільтрації) за відсутності досвідчених даних підбирають по рекомендаціях підприємств - виготівників, приведеним в каталогах або за іншими офіційними джерелами. Орієнтовні значення $\Delta_{\text{доп}}$ для рукавних фільтрів, складені на підставі узагальнення досвіду експлуатації в різних галузях промисловості, приведені в табл. 5.11.

Таблиця 5.11.

Допустимі питомі навантаження для рукавних фільтрів

Вид забруднювача	«Швидкість фільтрації» w , м/(м с), при способі регенерації		
	В, О	И	О
Сажа, біла сажа (кремнезем), перегони свинцю і цинку, конденсаційні аерозолі, пил косметичних і миючих порошків, молочний порошок, активоване вугілля, цементний пил від печей (у димових газах)	0,0075...0,01	0,0133...0,033	0,0055...0,0075
Перегони заліза і феросплавів, карбідних печей, пил цементу від млинів, глинозему, винищити, корунду, крохмалю, виробництва добрив, пластмас, ливарного виробництва	0,01...0,0125	0,025...0,042	0,0075...0,0092
Летюча зола, пил каменноугольная, тальк, пігментів, переробки рудий,	0,0117...0,0133	0,033...0,058	0,01...0,015

вапняку, каоліну, цементу від холодильників, керамічних виробництв, від песко- і дробеструйної очищення, фрита емалей			
Пил азбесту і дрібноволокнистих матеріалів, гіпсу, перлиту, виробництва гуми, шліфувальних процесів, куховарської солі, муки	0,0133...0,0258	0,042...0,075	
Пороши виробництва комбікормів, тютюнових виробів, обробки шкіри і дерева, грубі рослинні волокна	0,015...0,033	0,042...0,1	

Примітка: У - струшування, І - імпульсне продування, Про - зворотне продування.

3. Якщо регенерацію проводять з відключенням секцій, то до робочої площі фільтрації F додають величину площі фільтрації в них і знаходять загальну площу фільтру:

$$F_{\text{ем}} = F_t + F_p, *? \quad (5.11)$$

Площа фільтрації додаткових секцій, відключених на регенерацію F_p , м², можна знайти із співвідношення:

$$F_p = N \cdot F_{\text{ем}} \quad (5.12)$$

де N - число секцій у фільтрі; $F_{\text{ем}}$ - площа фільтрації однієї секції, м²; t - час відключення секцій на регенерацію, з; n - кількість регенерацій за 1 годину. За відсутності технічних даних по фільтру для регенерації зворотним продуванням або струшуванням можна оцінити приймати $i = 1...10$, $m = 2...20$ с.

Для фільтрів з імпульсним і струменевим продуванням, в яких відключення секцій на регенерацію не потрібне, загальна площа поверхні фільтрації $\Lambda_{\text{общ}}$ приймається рівною робочою $F_{\text{р}}$.

4. Необхідну кількість секцій або фільтрів знаходять по співвідношенню:

$$N = F_{\text{общ}} / f \quad (5.13)$$

де f - площа однієї секції фільтру, м².

Обчислене значення N округляють до цілого у бік збільшення.

5. Знаходять опір фільтрувальної установки, втрати тиску в комунікаціях і виконують підбір вентилятора.

Розділ 16

Мокре пиловловлювання

Процес мокрого пиловловлювання заснований на контакті запиленого газового потоку з рідиною, яка захоплює зважені частинки і відносить їх з апарату у вигляді шламу. Метод мокрого очищення газів від пилу вважається достатньо простим і в той же час вельми ефективним способом знепилювання.

Скрубери – мокрі пиловловлювачі з корпусом у вигляді вертикальної колони, порожнисті або з насадкою. Через скрубери проходить запилений потік, і в апарат вводиться рідина.

У мокрих скруберах реалізується тісний, бурхливий контакт газу і рідини, що супроводжується генерацією рідких крапель. Захоплення крапель газом може привести до віднесення рідини з скрубера в перегрівач, канал, вентилятор, димар, а потім в атмосферу. Якщо не прийняти заходи до відділення захопленої потоком рідини, то це може викликати корозію, ерозію, забивання, пошкодження вентиляторів і викиди забруднювача.

Забруднювач, що накопичується в рідині, використовуваний для зрошування скрубери, слід видаляти з системи.

У мокрих скруберах, призначених для пилозоловлювання, в якості зрошуючої рідини найчастіше використовують воду. Її витрата для різних типів апаратів може змінюватися від 0,1 до 10 м на 1000 м оброблюваних газів. При сумісному вирішенні питань пиловловлювання і хімічного очищення газів вибір зрошуючої рідини (абсорбенту) визначається умовами процесу абсорбції.

Мокрі пиловловлювачі мають ряд переваг перед апаратами інших типів:

- відрізняються порівняно невеликою вартістю і вищою ефективністю вловлювання зважених частинок в порівнянні з сухими механічними пиловловлювачами;
- можуть бути застосовані для очищення газів від частинок розміром до 0,1 мкм (наприклад, скрубери Вентурі);
- можуть не тільки успішно конкурувати з такими високоефективними пиловловлювачами, як рукавні фільтри і електрофільтри, але і використовуватися в тих випадках, коли ці апарати зазвичай не застосовуються, наприклад, при високій температурі і підвищеній вологості газів, при небезпеці спалаху і вибухів очищених газів, як теплообмінники змішення.

Перераховані переваги апаратів мокрого пиловловлювання дозволяють широко їх застосовувати в системах пилоочистки сушильних установок, особливо в других ступенях очищення.

Проте метод мокрого знепилювання має і ряд недоліків:

- вловлюваний продукт виділяється у вигляді шламу, що пов'язане з необхідністю обробки стічних вод і, отже, із дорожчанням процесу очищення;
- при охолодженні газів, що очищаються, до температури, близької до точки роси, а також при механічному віднесенні з газоочисного апарату газовим потоком крапель рідини пил може осідати в газопроводах, системах вентиляції, димососах. Крім того, краплевинос приводить до безповоротних втрат зрошуючої рідини;

- у разі очищення агресивних газів апаратуру і комунікації необхідно захищати антикорозійними матеріалами.

Порівняння мокрого очищення з сухим показує, що мокре очищення має меншу вартість (без шламового господарства) і, як правило, є ефективнішою, ніж суха. Більшість мокрих пиловловлювачів можуть застосовуватися для вловлювання найдрібніших частинок, навіть менше 1 мкм.

Мокрі пиловловлювачі за ефективністю і іншими показниками не поступаються рукавним фільтрам і електрофільтрам, а по ряду показників їх перевершують (можливість очищення газів з високою температурою і підвищеною вологістю, безпека при вловлюванні пожежо- і вибухонебезпечного пилу).

У скруберах будь-якого типу частинки видаляють за одним або декількома основними механізмами вловлювання: гравітаційної седиментації, відцентрового осадження, інерції і торкання, броунівської дифузії, термофорезу, дифузіїофорезу, електростатичного осадження. Швидкість осадження може бути збільшена завдяки укрупненню частинок внаслідок агломерації і конденсаційного зростання.

Розпізнавання механізмів процесів дозволяє створити раціональний метод аналізу і передбачити робочі характеристики скрубера.

Існують наступні апаратні механізми процесів мокрого вловлювання аерозолів:

- 1) вловлювання краплями рідини, що рухаються через газ;
- 2) вловлювання циліндрами (зазвичай твердими, типу проволочи);
- 3) вловлювання плівками рідини (зазвичай текучими по твердим поверхням);
- 4) вловлювання в міхурах газу (що зазвичай піднімаються в рідині);
- 5) вловлювання при ударі газових струменів до рідкої або твердої поверхні.

Залежно від способу організації поверхні контакту фаз і принципу дії мокрі пиловловлювачі можна підрозділити на наступні групи:

- порожнисті газопромивачі (порожністі скрубери і ін.);
- насадочні скрубери;
- барботажні і пінні апарати;
- апарати ударно-інерційної дії (ротоклони);
- апарати відцентрової дії;
- швидкісні апарати (СПУ Вентурі).

Іноді мокрі пиловловлювачі підрозділяються за витратами енергії на низьконапірні, середньонапірні і високонапірні. До низьконапірних апаратів відносяться пиловловлювачі, гідравлічний опір яких не перевищує 1500 Па (порожністі газопромивачі, мокрі апарати відцентрової дії). До середньонапірних відносяться апарати з гідравлічним опором від 1500 до 3000 Па (скрубери насадок, тарілчасті газопромивачі, газопромивачі з рухомою насадкою). До високонапірних апаратів відносяться пиловловлювачі, гідравлічний опір яких вище 3000 Па (апарати ударно-інерційної дії, механічні і швидкісні газопромивачі).

Оскільки основним недоліком мокрих способів знешкодження є необхідність обробки забруднених стоків, що утворилися в процесі очищення газів, то прийнятними можуть бути лише способи з мінімальним водоспоживанням. До ухвалення рішення про застосування мокрого способу очищення необхідно ретельно проаналізувати властивості оброблюваних викидів. Необхідно враховувати розчинність, реакційну здатність (можливість утворення вибухонебезпечних, корозійно-активних речовин і вторинних забруднювачів), корозійну активність

компонентів забруднювача і газу-носія. Для твердих забруднювачів важливі також змочуваність, захоплюємість, злипаємість, для рідких – змочуваність, густина, параметри фазових переходів.

Для загальнопромислового застосування рекомендовані наступні апарати: 1) циклони з водяною плівкою типу ЦВП, швидкісні промивачі СІОТ; 2) низьконапірні скрубери Вентурі типу КМП; 3) скрубери Вентурі з кільцевим регульованим перетином; 4) ударно-інерційні пиловловлювачі; 5) пінні апарати із стабілізатором піни.

Ступінь очищення газових викидів в мокрих скруберах може бути знайдена тільки на основі емпіричних відомостей по конкретних конструкціях апаратів. Методи розрахунків, що знайшли застосування в практиці проектування, засновані на припущенні про можливість лінійної апроксимації залежності ступеня очищення від діаметру частинок в імовірно-логарифмічній системі координат. Розрахунки по імовірнісному методу виконуються за тією ж схемою, що і для апаратів сухого очищення газів, але мають ще меншу збіжність.

Використання методу діаметру відсікання для прогнозу робочих характеристик скрубера засноване на уявленні про те, що єдиним і найбільш важливим параметром, що визначає і трудність видалення частинок з газу і робочі характеристики скрубера, є діаметр частинок, ефективність вловлювання яких складає 50%, тобто діаметр відсікання d_{50} . При аналізі діапазону розмірів загальна ефективність вловлювання пристрою залежить від частки кожної фракції і від ефективності вловлювання частинок кожного розміру.

Проскакування для пристроїв багатьох типів, вловлювання в яких відбувається за інерційним механізмом, може бути виражений так:

$$P_d = \exp(-A_e d_i^{B_e}) = 1 - \varepsilon, \quad (16.1)$$

де A_e – константа; d_i – розмір частинок i -ї фракції; B_e – константа; ε – ефективність, частка.

Іноді розрахунки виконують за так званим “енергетичним” методом, який витікає з припущення, що кількість енергії, необхідна для вловлювання частинок забруднювача, пропорційно ступеня очищення викидів незалежно від типу очисного пристрою.

У енергетичних методах розрахунку передбачається, що залежність фракційних коефіцієнтів захоплення від енерговитрат A можна виразити логарифмічно нормальним законом і апроксимувати графік залежності $\varepsilon=f(A)$ у імовірно-логарифмічній системі координат прямою (або близькою до прямої) лінією.

Повному коефіцієнту осадження частинок в апаратах надається вигляду експоненціальної функції енерговитрат:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-B \cdot A^k), \quad (16.2)$$

де A – питомі енерговитрати на осадження частинок забруднювача, Дж/м³; B і k – емпіричні величини.

Ступінь очищення пов’язують з числом одиниць перенесення (параметром, що характеризує процеси в масообмінних апаратах) наступним співвідношенням:

$$N = \ln(1 - \varepsilon_{заг})^{-1}. \quad (16.3)$$

У табл. 16.1 приведені числа одиниць перенесення для деяких значень коефіцієнтів очищення, обчислені за співвідношенням (16.3).

Таблиця 16.1

Залежність числа одиниць перенесення N від необхідного ступеня очищення газів ε %

η , %	N	η , %	N	η , %	N	η , %	N
90	2,303	99,0	4,605	99,90	6,908	99,990	9,210
95	2,996	99,1	4,710	99,91	7,013	99,991	9,316
95,5	3,101	99,2	4,828	99,92	7,131	99,992	9,433
96	3,219	99,3	4,962	99,93	7,264	99,993	9,567
96,5	3,352	99,4	5,116	99,94	7,419	99,994	9,721
97	3,507	99,5	5,298	99,95	7,601	99,995	9,903
97,5	3,689	99,6	5,521	99,96	7,824	99,996	10,127
98	3,912	99,7	5,809	99,97	8,112	99,997	10,414
98,5	4,00	99,8	6,215	99,98	8,517	99,999	11,513

З урахуванням співвідношення (16.3) залежність (16.2) в розрахунках зазвичай використовують у вигляді:

$$N = B \cdot A^k. \quad (16.4)$$

Значення B і k приведені в таблиці 16.2

Таблиця 16.2.

Значення B і k для деяких видів дисперсних забруднювачів

Назва забруднювача	B	k
Аерозоль з вапняних печей:	$5,53 \cdot 10^{-5}$	1,2295
- сульфату міді	$2,14 \cdot 10^{-4}$	1,068
- свинцю і цинку з шахтних печей	$6,74 \cdot 10^{-3}$	0,478
- фосфорної кислоти	$1,34 \cdot 10^{-2}$	0,631
Віднесення золи, пилоподібне спалювання вугілля	$4,34 \cdot 10^{-3}$	0,3
Пил вагранковий:	$1,36 \cdot 10^{-2}$	0,621
- доменна	$1,925 \cdot 10^{-1}$	0,326
- колошнікова	$6,61 \cdot 10^{-3}$	0,891
- конверторів при продуванні киснем зверху	$9,88 \cdot 10^{-2}$	0,466
- томасовських	$2,68 \cdot 10^{-1}$	0,259
- печей вапняних	$6,5 \cdot 10^{-4}$	1,053
- карбідних (у димових газах)	$0,82 \cdot 10^{-3}$	0,914
- мартенівських на повітряному дутті	$1,74 \cdot 10^{-6}$	1,594
- на збагаченому киснем дутті	$1,565 \cdot 10^{-6}$	1,619
- плавильних (для латуні) з оксидами цинку	$2,34 \cdot 10^{-2}$	0,532
- закритих (для ферохрому)	$6,49 \cdot 10^{-5}$	1,1
- електричних (для феросиліцію)	$2,42 \cdot 10^{-5}$	1,26
- електричних феросплавних (для силікомарганця)	$6,9 \cdot 10^{-3}$	0,67
- виробництва калійних добрив	$9,05 \cdot 10^{-11}$	2,92
- целюлоза	$4 \cdot 10^{-4}$	1,05
- виробництва каоліну	$2,34 \cdot 10^{-4}$	1,15
- мила (смердючі речовини)	$1,09 \cdot 10^{-5}$	1,415
- чорного щелока, обробка сухих газів	$9,3 \cdot 10^{-4}$	0,861
- чорного щелока, обробка заздалегідь зволжених газів	$1,32 \cdot 10^{-3}$	0,861
- фосфорних добрив (після циклону)	$1,2 \cdot 10^{-1}$	0,454
- тальк	$2,06 \cdot 10^{-1}$	0,351
Сажа процесів електрокрекінгу метану	10^{-5}	1,36
Солі натрію в димових газах печей термообробки стічних вод	$0,21 \cdot 10^{-5}$	1,515

Для отримання достовірних результатів потрібний і дуже коректний підхід до визначення частки енергії, що витрачається безпосередньо на вловлювання забруднювача. Точне теоретичне визначення цієї величини неможливе. У практиці проведення розрахунків величину A складають з декількох позицій енерговитрат індивідуально для кожного типу газоочисного пристрою. Для розглянутих конструкцій газопромивачів приймають, що частка енергії, яка безпосередньо

забезпечує очищення газового потоку, складається з енергії газового потоку, газорідинної суміші, що витрачається на створення, і енергії рідкого потоку, рідини, що витрачається на диспергування. Втрати енергії на тертя і місцеві опори, що виникають при русі потоків до області контакту фаз, повинні бути виключені з витрат на очищення.

Ступінь очищення, визначений за енергетичним методом, виявляється близьким до реальності для таких типів апаратів, в яких осадження забруднювачів забезпечується переважно за рахунок однієї з енергетичних складових, а внеском решти складових допустимо нехтувати в межах точності інженерних розрахунків. Так, наприклад, для газопромивачів з трубами Вентурі, відцентрових сепараторів ЦВП, скрубєрів ударно-інерційної дії можна без значної погрішності прийняти, що осадження частинок в них відбувається за рахунок енергії газового потоку. Тому опір цих апаратів по газу може бути прирівняний до величини питомих енерговитрат у формулі (16.4).

Список перерахованих вище апаратів може бути доповнений пінним абсорбером за умови, що в якості питомої енерговитрати на очищення газів приймається опір не всього апарату, а тільки тарілок з шаром піни (і за наявності – краплєвловлювачів і стабілізуючих решіток). Опір конструктивних елементів на вході і виході пінного апарату (відведень, трійників, розширення і звуження потоку) враховуватися не повинен.

У насадочних скрубєрах і відцентрових апаратах з форсуночними розпилювачами рідини слід враховувати втрати енергії і газового, і рідинного потоків.

Для порожнистих газопромивачів основні витрати енергії на очищення газів пов'язані з розпилюванням зрошуючої рідини. Питомі витрати енергії на розпилювання рідини, за умови використання досконалих конструкцій розпилювачів, можна підрахувати за співвідношенням:

$$A = \Delta p \frac{V_p}{V_g}, \quad (16.5)$$

де Δp – тиск рідини перед форсункою, Па; V_p , V_g – витрати зрошуючої рідини і газу, що очищається, м³/с.

Розрахунки мокрих скрубєрів за енергетичним методом виконують в наступному порядку.

1. За витратою, складом і властивостями викидів, необхідним ступенем їх очищення вибирають відповідний тип апарату.

2. З рівняння (16.3) або з таблиці 16.1 знаходять необхідне число одиниць перенесення.

3. Приймають значення B і k , використовуючи дані таблиці 16.2, якщо заданого виду пилу немає в таблиці, бажано провести пошук відомостей за іншими джерелами. При повній відсутності необхідних відомостей залишається приймати значення B і k для схожих видів пилу, промислового устаткування, технологічних процесів і так далі.

4. Знаходять з рівняння (16.4) частку енерговитрат A , необхідну для забезпечення необхідного числа одиниць перенесення.

5. Розподіляють знайдену величину енерговитрат A між елементами апарату, що створюють контакт газів з рідиною, враховуючи їх конструктивні особливості і уникаючи шаблонності.

6. Розраховують опори вказаних елементів, приводячи витрати і інші характеристики потоків до умов обробки в апараті.

7. Оцінюють прийнятність набутих значень опорів апарату для тих, що є в наявності або намічених до установки тягодуттєвих пристроїв. Рішення про використання апарату слід ухвалювати з урахуванням величини матеріальних і енергетичних витрат, кількості стоків, що утворюються, і так далі.

8. Якщо прийнято рішення про використання даного типу апарату, визначають за величиною опору швидкості газового потоку і рідини у відповідних елементах, а за ними – необхідні розміри елементів.

9. Уточнюють розміри елементів, приймаючи типові або стандартні вироби, виписують їх характеристики і підбирають тягодуттєві пристрої, насоси, інше допоміжне устаткування; проводять розрахунок комунікацій.

16.1. Порожністі газопромивачі

Порожністі газопромивачики (мал. 6.1) реалізують найбільш просту схему мокрого очищення з організацією промивки запилених потоків газу в газоходах (воздуховодах) або окремих камерах (ємкостях) різної форми. Зрошуюча рідина в них подається зустрічно або упоперек газового потоку. Щоб віднесення рідини із зони контакту було незначним, розмір крапель повинен бути не менше 500 мкм, а швидкість газового потоку не повинна перевершувати (0,8...1,2) м/с.

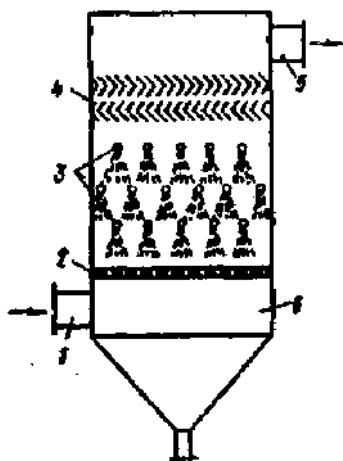


Рис. 16.1. Схема полового газопромивача: 1 - вхідний патрубок; 2 - газорозподільні грати; 3 - форсунки; 4 - каплеуловитель; 5 - вихідний патрубок; 6 - бункер.

Для зменшення габаритів установки швидкість потоку збільшують (іноді до 5 м/с і більш) і встановлюють на виході апарату каплеуловители. Зрошуючу рідину розбризкують найчастіше за допомогою відцентрових форсунок, підтримуючи її тиск в межах (0,3...0,4) Мпа. Такі форсунки дозволяють працювати на оборотній воді, з якої видалена груба суспензія. Діаметр зони зрошування однієї форсунки приймають в межах 500 мм. З цих умов визначають число форсунок, що встановлюються в скрубєрі.

Ефективність очищення в скрубєрі залежить від дисперсності пилу, розміру крапель, швидкості їх падіння, витрати рідини, швидкості пылега-зового потоку. У порожнистому скрубєрі питома витрата рідини знаходиться в межах 2.. 2,5 л/м, гідравлічний опір 220...250 Па.

Порожнисті газопромивщики можуть знайти застосування для осадження частинок більше 10 мкм. Порожнисті скрубєри використовують для очищення газів в металургійному, ливарному виробництві, наприклад, для очищення газів з вагранок.

Розрахунки параметрів порожнистих газопромивщиків з визначенням ступеня очищення по імовірнісному методу виконують в наступному порядку.

1) Приймають швидкість газів v в скрубєрі близько 1 м/с, перепад тиску порядку (200...250) Па і вибирають величину питомого зрошування m в межах (0,5...8) 10^{-3} м³ на 1 м³ газу.

2) Визначають середню площу скрубєра в перетині, перпендикулярному напрямку потоку газів:

$$F = V_{\Gamma} v, \text{ м}^2 \quad (6.6)$$

де v_{Γ} - витрата газів, що очищаються, м³/с, підрахований по температурі і тиску на виході з апарату.

Температуру газів на виході з скрубєра, що мали початкову температуру (150...200)°С і вище, за відсутності спеціальних вимог можна приймати на 100° нижче початковою, а температуру не нагрітих газів - рівною початковою.

Знаходять діаметр апарату з протиточним зрошуванням або еквівалентний діаметр для апарату з поперечним зрошуванням. Висоту апарату h з круглим поперечним перетином приймають порядку 2,5 діаметрів, а з прямокутним перетином - з конструктивних міркувань.

3) Визначають витрату рідини на зрошування:

$$L = m \cdot V_{\Gamma}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (6.7)$$

4) Визначають інерційні параметри ψ_{Γ} для фракцій частинок заданого складу: $\psi_{\Gamma} = d \cdot \sqrt{g} \cdot \sqrt{\rho_{\Gamma} - \rho_{\Gamma}} / \mu_{\Gamma}$ (6.8) де: d - діаметр частинок і - тій фракції, м; ρ_{Γ} - дійсна щільність частини, кг/м³; μ_{Γ} - поправка Кенінгема (таблиця 6.1); μ_{Γ} - динамічна в'язкість газу, Па-с (19,3 | 10⁻⁶ Па-с); λ - визначальний розмір, м.

Таблиця 6.3.

Поправка Кенінгема

$d \cdot 10^3, \text{ м}$	0,003	0,01	0,03	од	0,3	1,0	3,0	10
C	90	24,5	7,9	2,9	1,57	1,16	1,03	1

За визначальний розмір при розрахунку порожнистих скрубєрів приймають діаметр краплі зрошуючої рідини в межах (0,6...1) 10⁻³ м.

5) Визначають коефіцієнт захоплення частинок певних фракцій η :

$$\eta = \left(\frac{d}{\lambda} \right)^{2,33} \quad (6-9)$$

При $\psi_{\Gamma} = 150$ величина перевищує 0,995; при значеннях ψ_{Γ} більше 170 величину можна приймати рівною 1.;

6) Визначають значення парціальних (фракційних) коефіцієнтів очищення для скрубєрів з протиточним зрошуванням по формулі:

$$\varphi l = 1 - \exp\left(-\frac{3L \cdot r_{ji} \cdot (v + wK) h}{J}\right) \quad (6.10)$$

а для скрубєрів з поперечним зрошуванням по формулі:

$$\epsilon^* = 1 - A \cdot T \quad (6.11)$$

^L Vm)

У формулах (6.5) і (6.6) wK - швидкість осадження краплі, м/с; dK - діаметр краплі, м.

У порожнистих газопромивщиках встановлюються форсунки грубого распыла, що створюють краплі діаметром (0,6...1) 10^{-3} м. Швидкість осадження таких крапель можна знайти по діаграмі рис. 6.2.

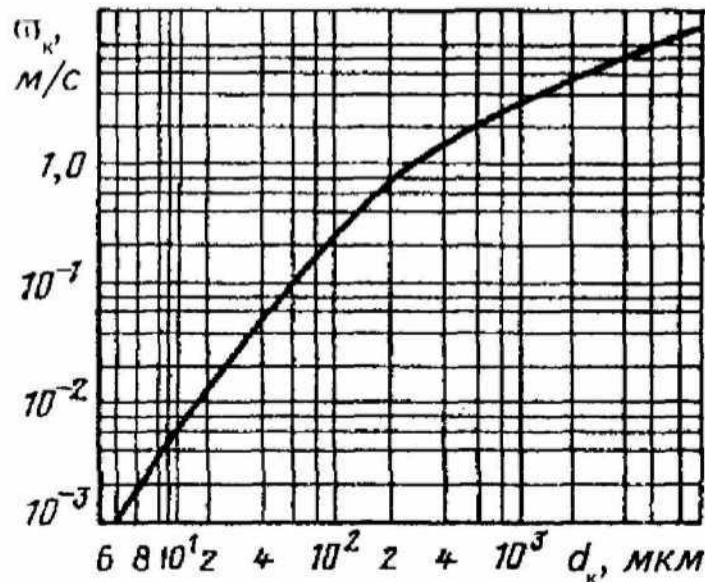


Рис. 6.2. Швидкість осадження крапель в порожнистих газопромивщиках

7) По знайдених парціальних (фракційним) коефіцієнтах очищення і заданому фракційному складі дисперсних забруднювачів визначають повний коефіцієнт очищення ϵ^* , використовуючи формулу (6.12), і обґрунтовують можливість застосування полого скрубєра або відмова від нього.

$$\epsilon^*_{\text{Общ}} = \frac{2}{g} \sum_{i=1}^n \frac{f_i}{Q_i} \quad (6.12)$$

де f_i - масова частка i -тя. фракції пилу.

16.2. Зрошувані циклони з водяною плівкою

Ефект дії зрошеного циклону в порівнянні із звичайним циклоном посилюється тим, що пил, що відкидається під дією відцентрових сил до стінок циклону, значною мірою поглинається водяною плівкою і перетворюється на шлам. В результаті запобігає вторинне віднесення пилу, що виділився з потоку.

У циклонах з водяною плівкою небезпека вибуху і спалаху пилу практично усувається.

Зрошуваний циклон типу ЦВП (мал. 6.3) складається з циліндрового корпусу з конічним днищем і воздухоотводящим патрубком і воздухоподводящей равика. Запилене повітря підводиться по дотичній до корпусу з швидкістю близько 20 м/с.

Поверхня стінок апарату зрошується водою за допомогою сопел, розташованих рівномірно у верхній частині циклону. Сопла знаходяться також у вхідному патрубку і призначені для змиву відкладень пилу. Тиск води перед соплами 2...2,5 кПа. Питома витрата води - 0,05...0,3 л/м . Одиночні циклони з водяною плівкою розраховані на очищення 1...20 тис. м /ч запиленого газу і у всьому діапазоні продуктивності забезпечують достатній ступінь очищення.

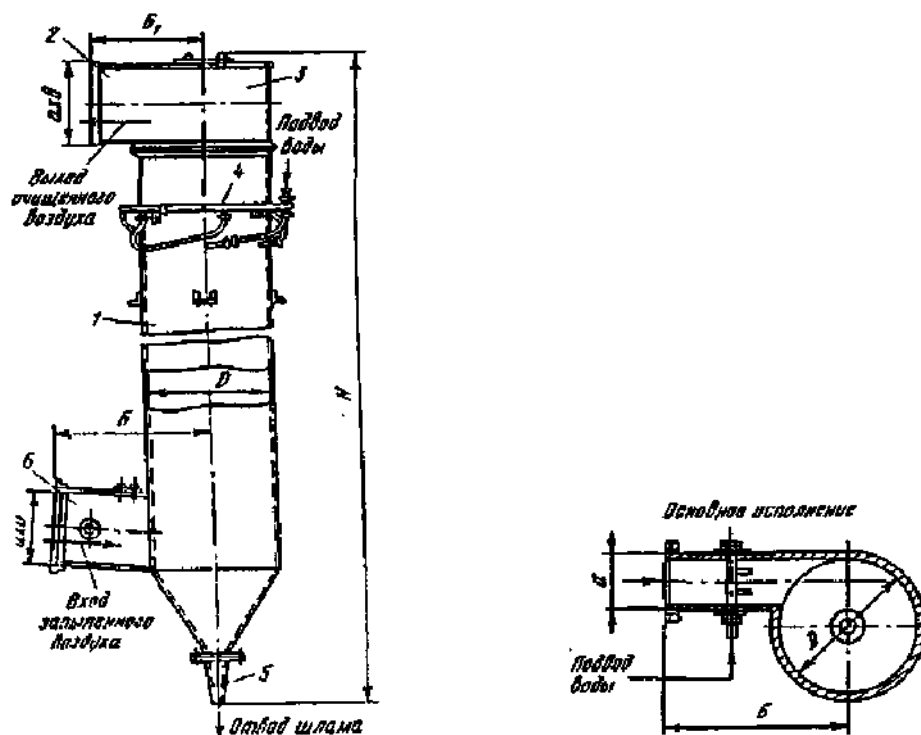


Рис. 16.3. Циклон з водяною плівкою ЦВП: 1 - корпус; 2 - вихідний патрубок; 3 - равлик; 4 - колектор; 5 - конусний патрубок (гідрозасув); 6 - вхідний патрубок.

Циклон з водяною плівкою типу ЦВП можна використовувати для очищення низькотемпературних газів з будь-яким видом пилу, що не цементується, окрім тієї, що схоплюється і реагує з водою. Він може бути застосований як каплеуловителя в установках з трубами Вентурі.

Загальна ефективність ЦВП - до 90 %, фракційна ефективність уловлювання частинок розміром 5... 10 мкм до 90.. 95 %.

Основні характеристики газопромивщиків ЦВП приведені в табл. 6.4 і 6.5.

Таблиця 6.4

Характеристика циклонів з водяною плівкою

Виконання циклону	Швидкість повітря, м/с				Гідравлічний опір, Па		Коефіцієнт гідравлічного опору	
	найменша*	найбільша**	найменша*	найбільша**	найменше	найбільше	віднесені й к $v_{ВХ}$, $\wedge_{ЗВХ}$	віднесені й к v_0 ,
Основне	16	25,6	4,5	7,05	360	915	2,3	30
Для роботи з підвищеною	32	44		6,0	940	1780	1,5	78

швидкістю								

Гідравлічний опір циклонів ЦВП залежить від витрати газу і конструкції апарату. На мал. 6.4 приведена номограма для визначення гідравлічного опору ЦВП різних типорозмерів залежно від витрати газу.

*У вхідному отворі циклону v_{BX} .

|| Умовна середня в поперечному перетині циклону v_0 .

Таблиця 6.5.

Основні розміри зрошуваних циклонів ЦВП.

Тип циклону	Розміри, мм					Загальна маса, кг
	D	Б		Н	ахб	
ЦВП-3	315	445	283	2436	110х195	63,9
ЦВП-4	400	505	360	3014	140х250	106,7
ЦВП-5	500	640	450	3684	175х310	161
ЦВП-6	630	765	565	4554	220х390	237
ЦВП-8	800	1025	720	5699	280х495	369,7
ЦВП-10	1000	1335	900	7044	350х620	569,5

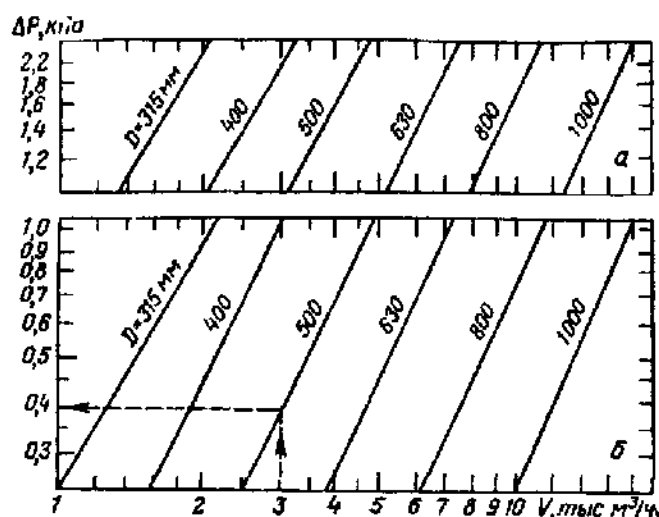


Рис. 16.4. Номограма для визначення гідравлічного опору ΔP циклону ЦВП залежно від витрати газу V і діаметру апарату/).

Ступінь очищення газу в циклоні ЦВП можна визначити на основі двох графіків, приведених на мал. 6.5 і 6.6.

По мал. 6.5 визначають діаметр частинок пилу, що уловлюються на 50%, залежно від гідравлічного опору апарату. Графік, приведений на мал. 6.6, побудований для певних умов: $\rho = 2650$ кг/м

$t = 20$ °С, $\mu_{гг} = 1,83 \cdot 10^{-5}$ Па·с, тому для інших умов величина діаметру частинок, уловлених на 50% (d_{50}), уточнюється по залежності:

$$3 \quad \partial \quad \backslash \quad \circ \quad 5$$

$$4 = d\% \quad (6-13)$$

де d_{50}^L , d_{50}^g - діаметри частинок, уловлених на 50% відповідно в дійсних і еталонних умовах.

Ступінь або ефективність фракційного очищення визначається по номограмі (мал. 6.6).

Для цього спочатку визначають параметр σ , а по кривій розподілу $D(d)$, побудованою в логарифмічно імовірнісних координатах на основі властивостей інтеграла вірогідності:

$$\ln \sigma = \ln(dm/dl_{60}) = \ln(dj/dm) \quad (6.14)$$

де dm - медіанний розмір частинок нормального розподілу, який є таким розміром, при якому маса частинок більше dm рівна кількості частинок дрібніше dm ; d_{16} і d_{84} - розміри частинок, відповідні ординатам 16 і 84% кривій $D(d)$.

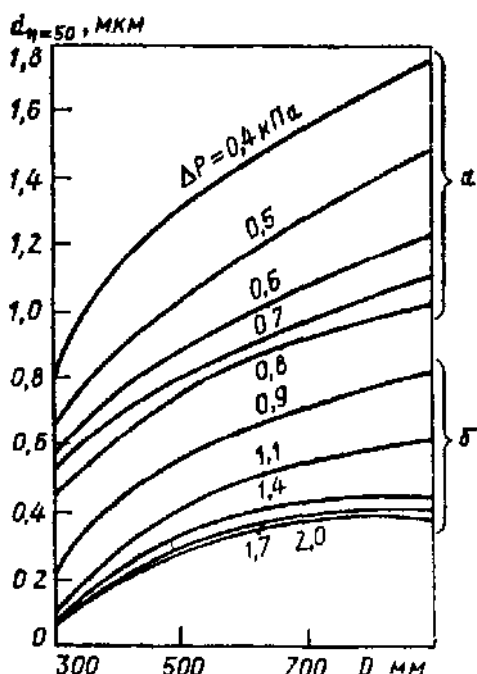


Рис. 16.5. Залежність діаметру частинок пилу, що уловлюються на 50% $d_{n=50}$, від гідравлічного опору ΔP і діаметру циклону ЦВП в основному (а) і швидкісного (б) виконання.

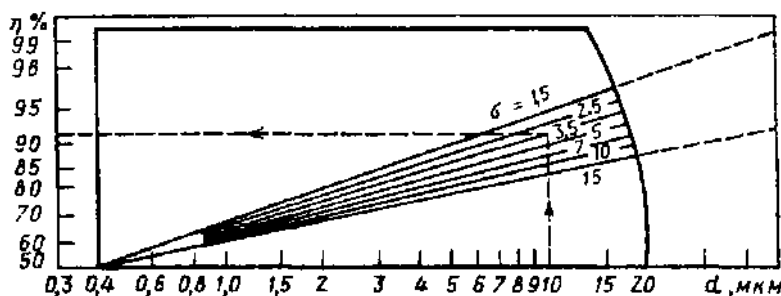


Рис. 16.6. Номограма для визначення ступеня очищення в циклонах ЦВП

Потім з координати $d_{n=50}$ на осі абсцис номограми (див. мал. 6.6) проводять пряму під кутом, відповідним знайденому по формулі (6.14) значенню σ . Таким чином, номограма є як би підготовленою до роботи.

Для визначення ступеня фракційного очищення необхідно для кожного середнього діаметру фракції знайти по лінії σ відповідну ординату ступеня очищення.

Загальний ступінь очищення для всього складу пилу знаходять по формулі:

$$i = i \quad (6.15)$$

де Π - масова частка фракції i -го розміру; e_i - ступінь очищення пилю від частинок i -го розміру; n - число вузьких фракцій у складі пилю.

Слід мати на увазі, що розглянутий метод розрахунку ефективності очищення розроблений для пилю з $d_{n=50} = 5...32$ мкм, тому поширювати метод на дуже тонкий пил ($d_{50} < 3$ мкм) не слід.

Крім того, метод розроблявся для повністю змочуваного пилю, тому для незмочуваного пилю набутого значення η_{50} для основного і швидкісного ЦВП слід збільшити відповідно в 2,2 і 1,9 разу, а при змочуванні 25...75% - в 1,5 і 1,4 разу.

Циклони-газопромивальники типу СИОТ працюють при підвищених швидкостях газового потоку (14...20 м/с). На відміну від циклонів ЦВП швидкісні промивачі СИОТ мають усередині додаткові завихорювачі, що дозволяє їх використовувати для очищення великих об'ємів газів (до 300 тис. м³/ч) без зниження ефективності.

Газопромивальники типу СИОТ мають непоганий ступінь очищення і розраховані на уловлювання змочуваного не волокнистого пилю, що не схоплюється, при початковій запиленій до 5 г/м³. У швидкісних промивачах СИОТ частинки пилю більше 5 мкм уловлюються більш ніж на 99%.

Основні характеристики апаратів приведені в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6.

Технічні характеристики газопромивальників СИОТ

Показатели	Номер газопромывателя								
	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Производительность, м/с, при скорости									
14 м/с	3,5	4,9	6,9	9,7	13,9	20,8	27,8	38,9	55,6
20 м/с	4,9	6,9	9,7	13,9	20,8	27,8	38,9	55,6	77,8
Диаметр входа, мм	560	665	790	940	1120	1330	1580	1880	2240
Внутренний диаметр аппарата, мм	1344	1596	1896	2256	2688	3192	3792	4512	5400
Максимальный расход воды, л/с	0,56	0,78	1,1	1,5	2,1	зд	4,3	6,1	8,6

Циклони-промивачі СИОТ за інших рівних умов мають габаритні розміри в 2,5...3 разу менше, ніж габаритні розміри скрубера, ефективність тих і інших апаратів приблизно однакова.

Розрахунки характеристик циклонів з водяною плівкою ЦВП і ступені очищення оброблюваних газів по імовірнісному методу проводяться в наступному порядку.

1. По перепаду, що розташовується, тиск вибирає вид виконання апарату. Циклон в основного виконання має менший опір (лінія 1, значення Ar_2 на графіці мал. 6.7; $J = 30$, чим циклон із зменшеним вхідним перетином (лінія 2, значення Ar_2 на графіці рис.6.7; $J = 75$). По заданій витраті газових викидів знаходять з графіка мал. 6.7 діаметр апарату і відповідну величину втрати тиску.

2. По графіку мал. 6.8 знаходять величину d_{50} . Значення $lg \alpha$ приймають рівним 0,838.

3. По формулі (4.38) визначають параметр осадження j_s і з таблиці 4.1 знаходять повний коефіцієнт очищення.

4. Обґрунтовують необхідність застосування газопромивальника ЦВП або приводять причини відмови. Слід взяти до уваги, що вміст дисперсних частинок в оброблюваних газових викидах не повинна перевищувати 2 г/м³. При вищих концентраціях циклони з водяною плівкою рекомендується використовувати як другий ступінь очищення з установкою на першому ступені сухого пиловіддільника.

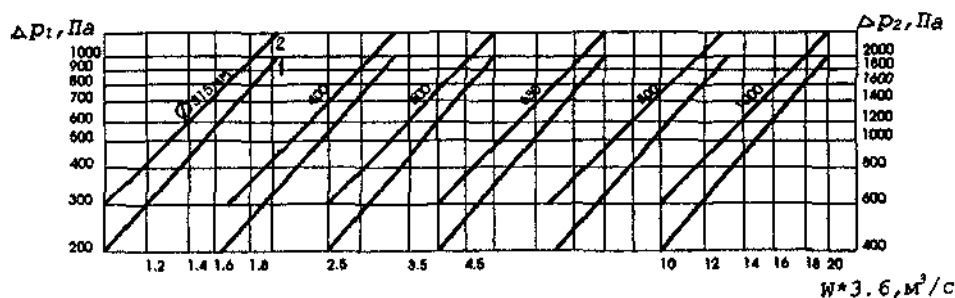


Рис. 6.7. Залежність перепаду тиску від витрати газу в газопромивщику ЦВП: 1 - циклон в основного виконання; 2 - циклон із зменшеним входним перетином.

Розрахунки параметрів відцентрового газопромивщика СИОТ виконують аналогічно попередньому.

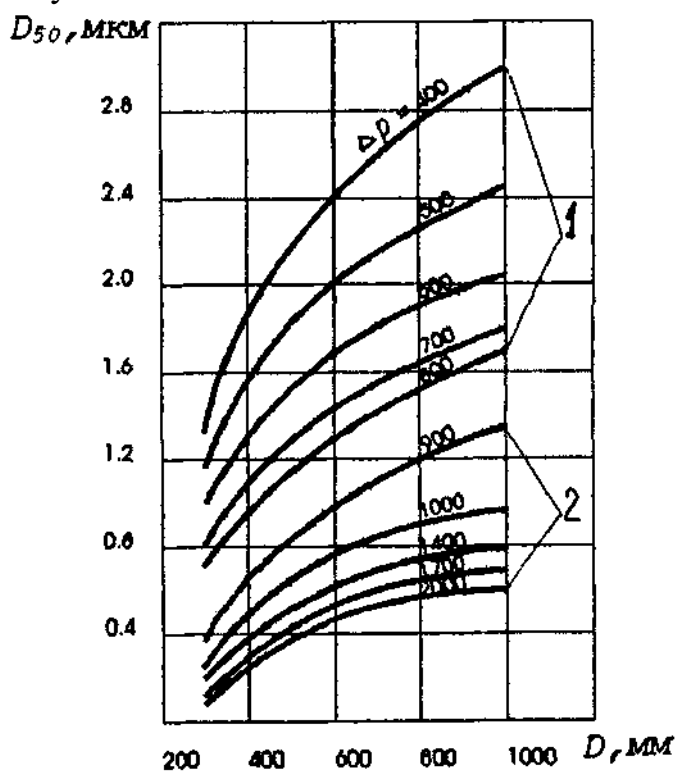


Рис.6.8. Залежність d_{50} від діаметру газопромивщика ЦВП: 1 - циклон в основного виконання; 2 - циклон із зменшеним входним перетином.

16.3. Пінні пиловловлювачі

Пінними пиловловлювачами є апарати, корпус яких роздільний ґратами з рівномірно розташованими дрібними отворами (мал. 6.9). Запилений потік поступає під ґрати, очищений віддається з верхньої частини корпусу. Вода поступає на ґрати зверху. Залежно від конструкції пиловловлювача вода з поверхні ґрат відводиться через отвори в ґратах і частково через злив, або тільки через отвори. Діаметр отворів в ґратах 3...8 мм. Живий перетин 0,15...0,25 м²/м².

Пінні апарати відносяться до низьконапірних пиловловлювачів, це одна з великих переваг даних апаратів перед іншими конструкціями. За способом відведення рідини з ґрат їх підрозділяють на два основні типи: з переливними

гратами і з провальними гратами. Апарати з переливними гратами не знайшли широкого розповсюдження, оскільки спостерігається заростання грат в ході процесу пиловловлювання. Більшого поширення набули апарати другого типу.

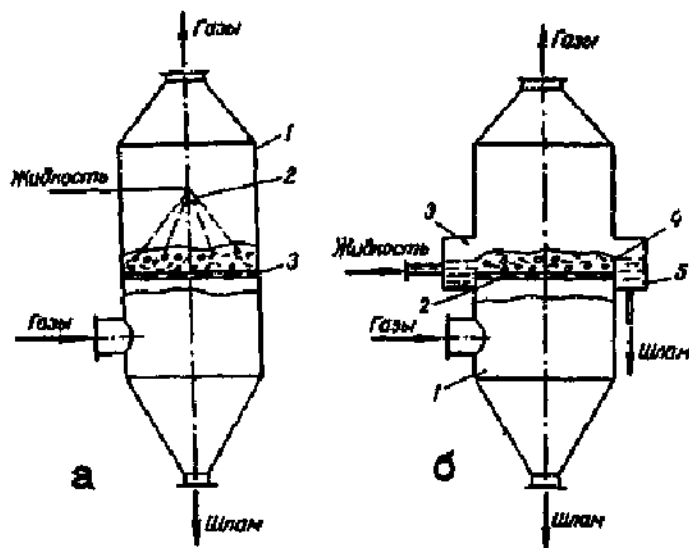


Рис. 16.9. Схеми пінних пиловловлювачів: *а* - пінний пиловловлювач з провальною тарілкою: 1 - корпус; 2 - зрошувальний пристрій; 3 - тарілка; *б* - пінний пиловловлювач з переливною тарілкою: 1 - корпус; 2 - тарелка; 3 - приймальна коробка; 4 - поріг; 5 - зливна коробка.

Для очищення газів найчастіше використовуються провальні щілинні і дірчасті тарілки. Діаметр отворів дірчастих тарілок приймають в межах 3...8 мм, а відносний вільний перетин (відношення площі отворів до площі тарілки) $f_a = 0,15...0,25$.

Отвори розбиті по рівносторонньому трикутнику. Крок між отворами S визначають із співвідношення:

$$S = \frac{dQ}{\sqrt{3}} \quad (6.16)$$

де dQ - діаметр отвору, м.

Щілинні тарілки можуть виконуватися гратчастими, трубчастими або колосниковими. Трубчасті і колосникові конструкції виготовляють зварними з трубок, прутков або пластин. Ширину щілини в тарілці B приймають 4...5 мм, вільний перетин /св - (0,2...0,25).

Оптимальна товщина дірчастих і щілинних тарілок 4...6 мм. Питоме зрошування для очищення газів від пилу приймають в межах 0,4...0,6 літрів на 1 м³ газів.

Для створення стійкого пінного шару на гратах необхідно підтримувати швидкість газу у вільному перетині апарату в межах 0,8...2,2 м/с, при цьому мінімальна швидкість газів, необхідна для створення стійкого пінного режиму на тарілці, складає порядка 1 м/с.

У новітніх пінних апаратах з провальними гратами застосовують так звані стабілізатори пінного шару, що дозволяє підвищити швидкість газу до 4 м/с.

На мал. 6.10 приведений загальний вид пінного апарату із стабілізатором шаруючи (ПАС). Як стабілізатор рекомендується використовувати стільникові ґрати висотою $A_{ст} = 60$ мм з осередками розміром від 35×35 до 45×45 мм.

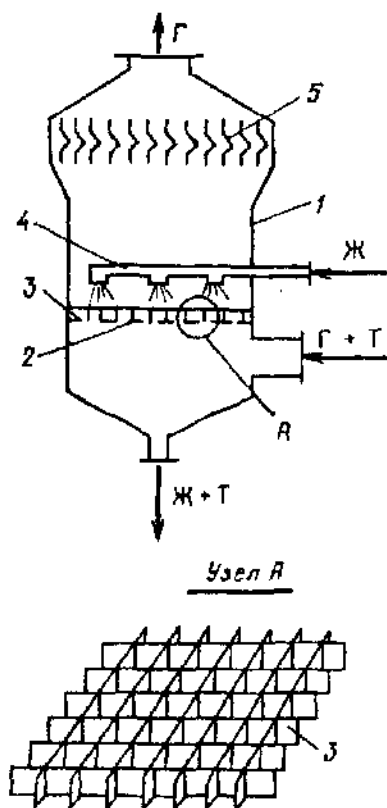


Рис. 16.10. Пінний апарат ПАС із стабілізатором шару піни: 1 - корпус; 2 - провальна тарілка; 3 - стабілізатор піни; 4 - зрошувач; 5 - бризковловлювач.

На мал. 6.11 приведені залежності висоти шару піни від швидкості руху газу у вільному перетині апарату. З графіків видно, що стабілізатор дозволяє збільшити висоту шаруючи майже в 2,5 разу у всьому діапазоні швидкостей.

Ґрати промислових апаратів ПАС можуть бути дірчастими з отворами величиною $\phi_{от} = 5 \dots 8$ мм і живим перетином від 14 до 22%, а також трубчастими з трубами діаметром 20...32 мм і проміжками між ними $a_{т} = 3,0 \dots 6,5$ мм при живому перетині $S_{от} = 13,0 \dots 18,2$ %. Апарати з трубчастими ґратами позначаються ПАСС-Т, а з дірчастими - ПАСС-Д. Розроблений нормалізований ряд апаратів ПАС з корпусами круглого перетину на витрату газу $V = 2,5 \dots 64$ тис. м³/ч (табл. 6.7).

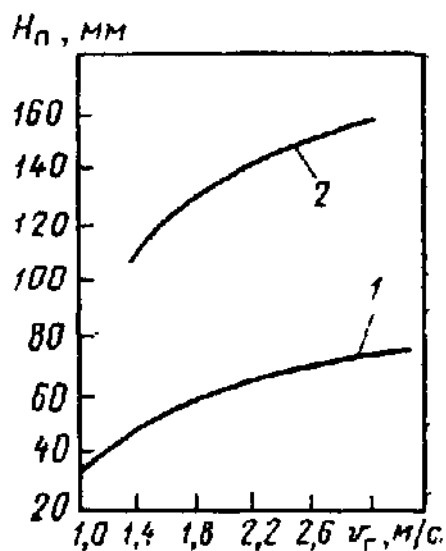


Рис. 16.11. Залежність висоти шару піни від швидкості газу в апараті без стабілізатора (1) і із стабілізатором (2).

Розрахунок гідравлічного опору пінних апаратів із стабілізатором шару може бути проведений по залежності:

$$A^*U = AP + A_{RP} + A_{PA} + A_{PS} \quad (6.17)$$

де A_{RP}, A_{PA}, A_{PS} - втрати натиску відповідно сухих ґрат, шару піни, за рахунок сил поверхневого натягнення, корпусу апарату. Величина A_{PP} (у Па) може бути знайдена по формулі:

$$A_{PP} = 1,82(u^2)^{0,667} \quad (6.18)$$

де u^2 - швидкість газу в отворах ґрат, м/с.

Таблиця 6.6

Нормалізований ряд апаратів типу ПАСС

Тип апарату	Витрата газу, тыс. м ³ /ч	Швидкість газу в своб. перетині апарату, м/с	Основні розміри апарату, мм			
			висота H	діаметр D	діаметр вихідного патрубку А	діаметр вхідного патрубку А
ПАСС-Т(Д)-3	2,5- 3,4	2,9	3670	600	285	100
ПАСС-Т(Д)-4	3,4- 4,5	2,85	3790	700	355	100
ПАСС-Т(Д)-5	4,5- 6,2	2,96	3910	800	400	100
ПАСС-Т(Д)-7	6,2- 8,4	3,05	4160	920	450	100
ПАСС-Т(Д)-10 ПАСС-Т(Д)-14	8,4-11,7 11,7-16,5	2,94 2,95	4300 4860	1100 1300	500 560	100 100
ПАСС-Т(Д)-20 ПАСС-Т(Д)-30	16,5-23,2 23,2-32,6	3,12 3,05	5300 6050	1500 1800	630 800	100 150
ПАСС-Т(Д)-40 ПАСС-Т(Д)-55	32,6-45,7 45,7-64,0	3,14 3,10	6710 7630	2100 2500	900 1020	150 150

Втрата натиску (у Па) за рахунок шару піни на ґратах:

$$A_{PP} = 0,441 \rho_{ж} S / (u^2)^{0,667} \quad (6.19)$$

де y_n - висота шару піни, м; $\rho_{ж}$ - щільність рідини, кг/м³; u^2 - швидкість газу в отворах ґрат, м/с.

У рівнянні (6.18) висота шару піни (мм) може бути знайдена по залежності:

$$y_n = 4,8 \cdot 10^{-2} (C^4)^{0,9} \quad (6-20)$$

де m - щільність зрошування, л/м газу; d_0 - діаметр отворів ґрат

мм; S_0 - відносна площа вільного перетину ґрат, м / м .

Втрату натиску (γ Па) під дією сил поверхневого натягнення розраховують по формулі:

$$AP_{(T=4\text{cm})} \quad (6.21)$$

де CT - коефіцієнт поверхневого натягнення, н/м.

Гідравлічний опір корпусу апарату розраховують по залежності:

$$A_{\text{пр}} = f_{\text{пр}} \cdot \gamma_{\text{пр}} / 2 \quad (6.22)$$

де $\gamma = 25 \dots 28$ - коефіцієнт гідравлічного опору корпусу апарату.

Ступінь фракційного очищення (γ %) може бути розрахована по залежності:

$$\eta = 1001 - 87 \cdot d(1,37 - \gamma) / (\gamma \cdot r_0^{0,25}), \quad (6.23)$$

де dT - середній еквівалентний розмір частинок фракції, мкм; γ_n - висота шару піни, мм; $\gamma_{\text{пр}}$ - швидкість газу в перетині апарату, м/с.

Загальний ступінь очищення слід визначати по рівнянню (3.7) або (3.10).

16.4. Ударно-інерційні пиловловлювачі

У промисловості широко поширені ударно-інерційні пиловловлювачі (званих в літературі також газопромивщиками ударної дії, импакторными і скруберами, що бризкають, скруберами з самораспылением або з самогенерацією крапель, ротоклонами типу N).

У скруберах ударно-інерційного дії суміш оброблюваних газопилових викидів з промивальною рідиною створюється в результаті удару газового потоку об поверхню рідини, при цьому газовий потік різко міняє напрям руху, а частинки пилу за інерцією відкидаються на поверхню рідини і захоплюються нею. Краплі, що утворюються при ударі, мають розміри до 400 мкм. Вся енергія, необхідна для створення суміші, підводиться газовим потоком.

Найбільш простий по конструкції *импакторный пиловловлювач* ударно-інерційного типу показаний на рис 6.12, а. Він є вертикальною колоною, в нижній частині якої знаходиться шар рідини. Запилені гази із швидкістю 20 м/с прямують зверху вниз на поверхню рідини. При різкій зміні напрямку руху газового потоку (на 180°) зважені в газі частинки осідають на поверхні води, а очищені гази прямують у вихідний газопровід. Апарати цього типу задовільно працюють тільки при уловлюванні частинок розміром більше 20 мкм. Шлам з пиловловлювача віддаляється періодично або безперервно через гідрозасув. Для видалення ущільненого осаду з дна застосовують сопла, що змивають.

Серед мокрих пиловловлювачів ударної дії можна виділити ще два найбільш поширених в промисловості апарату: *статичний пиловловлювач типу ПВМ* (рис 6.14, б), і *скрубер Доуля*, показаний на рис 6.12, в.

У промивачі типу ПВМ (пиловловлювачі вентилятори мокрі) забруднені гази подаються безпосередньо в корпус апарату, а набувають необхідної швидкості для утворення суміші вже в щільному каналі. Схема руху газового потоку в камері цього апарату приведена на мал. 6.12, б. Осадження пилу в ударно-інерційних скруберах відбувається в 2 стадії. Крупні фракції пилу із-за інерції не можуть повернути після удару разом з потоком газу. Дрібні фракції, що захоплюються

газом, уловлюються краплями рідини і унаслідок утворення газорідинної суміші відділяються від потоку після проходження імпульсної щілини або на сепараторі віднесення. Апарати ПВМ розраховані на наступних продуктивності по повітрю, що очищається: 3000, 5000, 10000, 20000 і 40 000 м³/ч.

У скрубери Дойля газ на очищення поступає через труби, в нижній частині яких встановлені конуси, що збільшують швидкість газових потоків (до 35...55 м/с). З цією швидкістю газовий потік ударяється об поверхню рідини, створюючи завісу з крапель. Рівень рідини в скрубери на 2...3 мм нижче за кромку труби, що газопідводить. Гідравлічний опір складає 1,5 кПа.

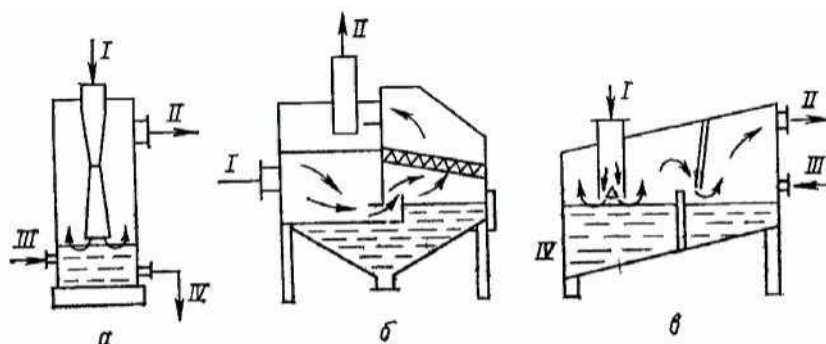


Рис. 16.12. Скрубери ударно-інерційної дії: а – імпакторний скрубери; б – газопромивач типу ПВМ; в – скрубери

Ступінь очищення в імпакторних скруберах сопоставима з распылительними скруберами при однаковому перепаді тиску. Такі апарати ударної дії, як високошвидкісні скрубери Дойля, здатні уловлювати частинки пилу субмікронних розмірів, але вимагають значної енергії для створення достатнього перепаду тиску в потоці газів, що очищаються.

Фракційний ступінь очищення повітря в пиловловлювачі ПВМ визначають, виходячи з відомого дисперсного складу по кривій фракційній ефективності (мал. 6.13) Залежності на рис 6.13 побудовані для частинок пилу щільністю $\rho_{ch} = 2600$ кг/м³. При уловлюванні пилу з щільністю ρ_{ch}' , відмінною від 2600 кг/м³, перераховують діаметр частинок по формулі

$$d_{4'} = d \sqrt{\frac{\rho_{ch}}{\rho_{ch}'}} \quad (6.24)$$

де

$d_{4'}$ — умовний діаметр частинки, який слід брати на осі абсцис графіка.

Загальний ступінь очищення в пиловловлювачі ПВМ можна визначити по формулі (3.7) або (3.10).

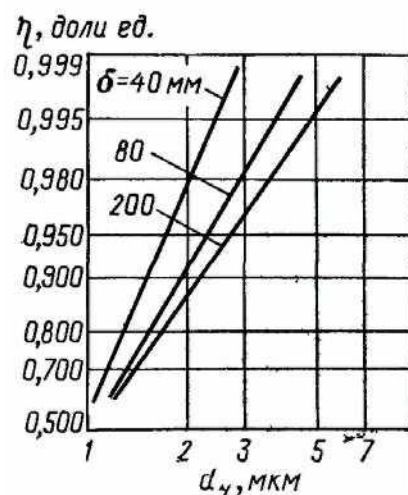


Рис. 16.13. Коефіцієнти очищення для пиловловлювача типу ПВМ при різних рівнях води 8.

Технічні характеристики ударних промивачів ПВМ приведені в таблиці 6.8.

Таблиця 6.8.

Технічні характеристики газопромивщиків ПВМ

Показники	Типорозмір промивача				
	3	5	10	20	40
Номінальна продуктивність по оброблюваному газу, м/с	0,83	1,39	2,78	5,56	11,11
Марка вентилятора	ЦП 13-50 ЦП 7-40		ЦП 7-40	ЦП 7-40	ЦП 4-76 N10
Об'єм води в промивачі, м ³	N3,2	N5 0,45 0,65	N6 1,45	7V8 2,2	5,5
Маса пиловловлювача (без води і електродвигуна), кг	754	1208	1998	3050	4737
Габарити, мм: довжина	1250	1650	2500	2510	4750
ширина	1300	1 1359	1514	2314	2416 1
висота	2848	1 3080	3412	3680	4110 1
Довжина однієї перегородки, м	0,8	1,21	2,0	2,0	4,0-
Число перегородок, шт.	1	1 1	1	2	2 1

Достатньо поширені і так звані *ротоклоны* типу *N* (мал. 6.14), що відрізняються від промивачів ПВМ складнішою формою імпеллеров (щілин) або схемою переміщення потоків. Ці апарати розраховані на очищення від 3 до 40 тис. м/ч запиленого газу.

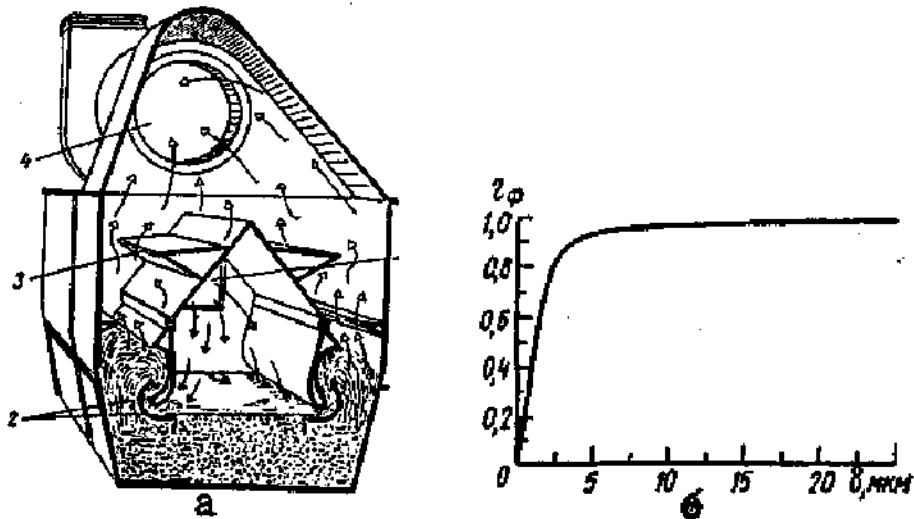


Рис. 16.14. Ротоклон типу *N*: *a* - схема ротоклона: 1 - пристрій для підведення газів; 2 - направляючі лопатки; 3 - краплевідбійник; 4 - пристрій для відведення газів; *б* - графік фракційної ефективності ротоклона.

Запилений потік поступає в приймальну камеру і потім проходить через імпеллер. Нижня частина корпусу заповнена водою, рівень якої підтримується автоматично. Повітря, проходячи імпеллер із швидкістю 15... 16 м/с, відповідно до його конфігурації неодноразово змінює напрям руху. Частина води захоплюється повітрям (газом), утворюючи суцільний водо-повітряний (газовий) потік.

Частинки пилу затримуються, випадають на дно у вигляді шламу і періодично віддаляються. Ротоклон допускає коливання витрати повітря (газу), що очищається, в межах $\pm 15\%$. Витрата води невелика, він не перевищує 0,03 л/м. Гідравлічний опір апарату складає 1000... 1500 Па.

Питома витрата води при періодичному зливів шламу і температурі газу не вище 40 °С складає 5-10 г/м, а при безперервному - приблизно 20 г на 1 г уловленого пилу. Основною гідністю цих апаратів є дуже мала витрата води. У діапазоні гідравлічних опорів 1,6...2,0 кПа ці пиловловлювачі по ступеню очищення наближаються до швидкісних промивачів СИОТ і ЦВП, а при гідравлічному опорі 2,0...2,5 кПа перевищують ефективність вказаних конструкцій, але вона все ж таки нижче, ніж у скрубєрів Вентурі.

Гідравлічний опір (Па) ударно-інерційних пиловловлювачів ротоклонного типу розраховується по формулі:

$$\Delta P = 10(A\# + F0'5) \quad (6.25)$$

де ΔP - перепад висот між рівнями рідини в ротоклонах, мм; V - витрата газу на 1 пог. м довжини перегородки, м³/ч.

При уловлюванні середнєдисперсних пилу ΔP підтримують в межах 20...60 мм, а при високодисперсних - від 60 до 200 мм. Витрата газу на 1 пог. м довжини перегородки встановлюють в межах 2... 7,5 тис. м³/ч.

Фракційний ступінь очищення в ротоклонних пиловловлювачах можна визначити залежно від розміру уловлюваних частинок по графіку (мал. 6.15), а, загальний ступінь очищення - по формулі (3.7) або (3.10).

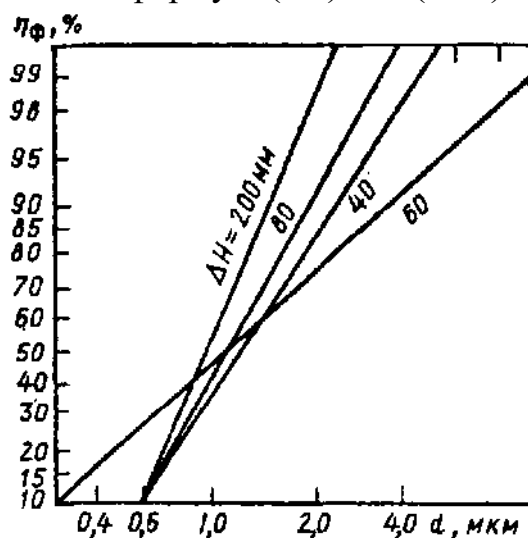


Рис. 16.15. Залежність фракційного ступеня очищення % від розміру частинок в ротоклонах

Апарати з самораспылением вигідно відрізняються від інших типів мокрих скрубєрів низьким споживанням води. Для підтримки її постійного рівня у ванні необхідно лише компенсувати втрати з шламами, віднесення крапель через сепаратора - каплеуловитель, випаровування з поверхні і випаровування рідини, що диспергує.

За наявними даними ротоклоны типу *N* застосовуються в ливарному виробництві (очищення повітря від вибивних ґрат, від установок для сушки піску і глини, для очищення від механічних домішок), а також для очищення викидів при виробництві азбесту, при поліровці металу, випаленні вапняку. Ефективність очищення знаходилася в межах 89,0...99,4%.

Мокрий пиловловлювач РІСІІ. Апарат призначений для тонкого очищення повітря, що поступає від аспіраційних або технологічних систем. Він може бути встановлений на другому ступені очищення після пиловловлювача, що забезпечує грубе або середнє очищення (мал. 6.16). Після ефективного двоступінчатого очищення повітря може бути направлений на рециркуляцію.

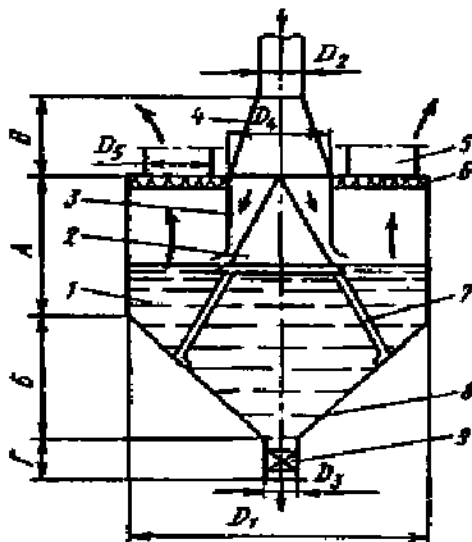


Рис. 16.16. Мокрий пиловловлювач РІСИ: 1 - циліндрова камера; 2 - конус-розсікач; 3 - відбивач; 4 - дифузор; 5 - патрубок для відведення повітря; 6 - каплеуловитель; 7 - лапки для кріплення; 8 - бункер конічної форми; 9 - патрубок для стоку шламу.

Пиловловлювач складається з циліндрової камери з конічним бункером в її нижній частині для осадження шламу. Усередині камери розташовані конус-розсікач і циліндровий відбивач, плавні переходи, що мають на кінцях, до поверхні води. Цим забезпечується плавне зіткнення запиленого потоку з водною поверхнею під певним кутом. У верхній частині апарату встановлені каплеуловитель і патрубки для виходу очищеного повітря. Для видалення шламу служить патрубок.

При зіткненні запиленого потоку з водною поверхнею частинки пил, що знаходиться в потоці, змочується водою і осідає на дно бункера. Знепилене повітря віддаляється назовні.

При застосуванні мокрого пиловловлювача на другому ступені його встановлюють за вентилятором, тобто на нагнітальній лінії вентилятора.

Ступінь очищення повітря в мокрому пиловловлювачі складає 99,9 %, гідравлічний опір - 400 Па.

Витрата води в апараті незначна — декілька літрів в годину, оскільки вода витрачається лише на випаровування з поверхні і віднесення вологи з повітрям. Шлам віддаляється один раз в декілька місяців. У холодну пору року при установці пиловловлювача поза приміщенням проводиться теплоізоляція корпусу і підігрів за допомогою водонагрівача або подача пари або гарячої води в невеликій кількості в апарат.

Розроблені такі апарати на продуктивність 600...10000 м³/ч. Характеристика пиловловлювача приведена в табл. 6.9.

Таблица 6.9.

Характеристика мокрих пиловловлювачів РІСИ

№ пылеуловителя	Производительность, м ³ /ч	Размеры, мм									Масса без воды, кг
					I	A	A	A	A	A	
1	до 600	300	300	200	100	500	100	80	200	100	21,4
2	до 1500	350	350	200	100	600	200	80	300	100	49,2
3	до 3500	400	400	300	200	900	300	100	400	180	63,1
4	до 7000	500	500	400	200	1200	400	100	500	280	98,4

5	до 10000	700	700	600	200	1500	500	100	600	315	175

Розрахунки характеристик скрубєрів ударної дії типу ПВМ з визначенням ступеня очищення оброблюваних газів по імовірнісному методу виконують в наступному порядку.

1. По заданій витраті газових викидів, м /с, використовуючи таблицю 6.8, підбирають типоразмер промивача і визначають витрату газів VII, м /(см), на 1 м довжини перегородки (див. мал. 6.12, *би*). Орієнтування величину питомої витрати можна приймати в межах (0,6...2,5) м /(см).

2. Розраховують гідравлічний опір промивача по емпіричній формулі:

$$A_p = 10 A / + 90 \text{ — , Па} \quad (6.26)$$

$v I)$

де $A /$ - відстань від низу перегородки до верхнього рівня води, м (див. мал. 6.12, *би*).

При уловлюванні мелкодисперсних пилу значення $A /$ приймають не менше (60... 100) мм, а верхня межа може досягати 200 мм і більш. Для середнєдисперсних пилу дотримуються значень $A /$ в межах (20...60) мм. По величині опори уточнюють необхідний натиск вентилятора.

3. По формулі (4.38) визначають ступінь очищення газів в пиловловлювачі, виходячи з таких досвідчених даних:

$$d_{50=1,5} \text{ МКМ; } \lg \epsilon_4 = 0,3 \text{ при } A / = 40 \text{ мм; } 0,24 \text{ при } A / = 80 \text{ мм; } 0,17 \text{ при } A / = 200 \text{ мм і } 0,13 \text{ при } A / = 300 \text{ мм.}$$

Для інших значень $A /$ величину $\lg \epsilon_4$ можна знаходити інтерполяцією. Ступінь очищення в інших типах імпакторних промивачів (ротоклонах, скрубєрі Дойля і так далі) також визначається за досвідченими даними.

4. Обґрунтовують необхідність застосування газопромивщика типу ПВМ або причини відмови.

16.5. Швидкісні пиловловлювачі (скрубєри Вентурі)

Серед мокрих пиловловлювачів найбільшою ефективністю очищення газів (повітря) від дрібнодисперсного пилу володіють установки з трубою Вентурі (СПУ Вентурі).

Вища ефективність пиловловлювання в порівнянні з порожнистими газопромивщиками досягається в скрубєрах Вентурі створенням розвиненої поверхні контакту фаз, що вимагає і значно вищих енерговитрат. Утворення тонкодисперсного аерозоля відбувається при цьому як за рахунок механічної диспергации промивальної рідини, так і унаслідок інтенсивного випаровування крапель при різкому падінні тиску в горловині. Очевидно, це приводить також до підвищення вологості газу і інтенсифікації капілярної конденсації води на поверхні частинок пилу. Остання причина може служити поясненням того, що ступінь очищення пилу в скрубєрах Вентурі слабо залежить від її змочуваності.

Під СПУ Вентурі розуміють апарат, що складається з труби-распылителя для подрібнення рідини під дією повітряного (газового) потоку, рухомого з великою швидкістю, і каплеуловителя (мал. 6.17). Основна частина скрубєра — сопло

Вентурі 2, в конфузорну частину якого підводиться запилений потік газу і через відцентрові форсунки 1 рідина на зрошення. У конфузорній частині сопла відбувається розгін газу від вхідної швидкості ($w = 15 \dots 20$ м/с) до швидкості у вузькому перетині сопла $40 \dots 200$ м/с і більш. Процес осадження частинок пилу на краплі рідини обумовлений масою рідини, розвиненою поверхнею крапель і високою відносною швидкістю частинок рідини і пилу в конфузорній частині сопла. Ефективність очищення в значній мірі залежить від рівномірності розподілу рідини по перетину конфузорної частини сопла. У дифузорі труби відбувається зростання тиску і зниження швидкості потоку до $15 \dots 20$ м/с, що сприяє коагуляції дрібних частинок. З дифузора газовий потік виносить краплі рідини з частинками пилу, що осіли на них, в каплеуловитель 3, де відбувається сепарація взвешених частинок. Для уловлювання пилу після труби Вентурі можливе використання скруберів, циклонів з водяною плівкою, циклону-промивача СИОТ і ін. У цих апаратах здійснюється уловлювання попереднє скоагулірованих пилових частинок. Каплеуловитель зазвичай виконують у вигляді прямооточного циклону.

Характерним елементом для даного пристрою є труба Вентурі (мал. 6.17, 6.18), де відбувається контакт повітряного (газового) потоку, що містить в зваженому стані пилові частинки, з тонкораспыленной водою.

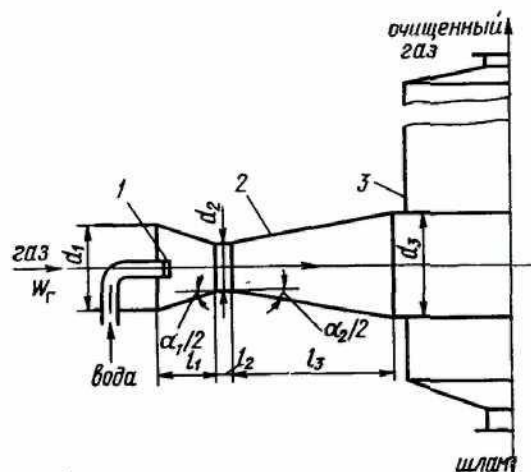


Рис. 25. Скруббер Вентури

Рис. 16.17. Скруббер Вентурі: 1 - форсунка; 2 - сопло Вентурі; 3 - краплевловлювач

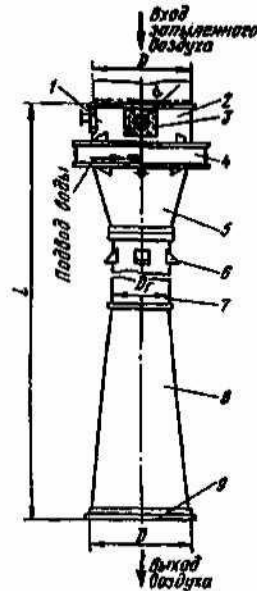


Рис. 16.18. Труба Вентури: 1 – лаз герметичний; 2 – циліндр; 3 – пристосування, що змиває; 4 – камера; 5 – конфузор; 6 – опора; 7 – горловина; 8 – дифузор; 9 – фланець.

По величині гідродинамічного опору труб Вентури розрізняють низьконапірні і високонапірні скрубери. Низьконапірні скрубери з опором розпилювача до 5 кПа застосовуються для уловлювання пилу з розмірами частинок більше 20 мкм.

Ефективне уловлювання дрібних частинок вимагає вищих енерговитрат. Скрубери з високонапірними трубами Вентури можуть облягати частинки розміром 0,5 мкм і вище. Швидкість потоку у високонапірних трубах наближається до швидкості звуку, а їх опір досягає декількох десятків кПа.

Для труб Вентури оптимальними вважаються наступні геометричні характеристики (див. мал. 6.17): кут звуження конфузора $\alpha_1 = 15^\circ \dots 28^\circ$, довжина горловини $l_2 = 0,15 d_2$, кут розкриття дифузора $\alpha_2 = 6^\circ \dots 8^\circ$.

Скрубери Вентури можуть розрізнятися пристроєм каплеуловителів, конструкціями і способами установки труб, способами підведення рідини. Каплеуловителі можуть бути виносними або розмішатися в одному корпусі з трубою. Труби можуть мати круглий, кільцевий або прямокутний (щілинне) перетин горловини. Труби з круглим перетином застосовують для невеликих витрат, а труби з щілинним або регульованим кільцевим перетином – для великих. При необхідності труби компонуються в групи і батареї.

Вода в горловину труби може подаватися через форсунки різних конструкцій, встановлені центрально або периферійно, або стікати у вигляді плівки по стінках конфузора (мал. 6.19, а, б, в). Гірші показники по дробленню крапель і, отже, по ступеню очищення мають бесфорсуночные труби Вентури (мал. 6.19, г). В той же час вони допускають використання оборотної неочищеної рідини, що може бути важливим при сумісному уловлюванні газоподібних і дисперсних домішок (наприклад, при нейтралізації кислих газів вапняним молоком).

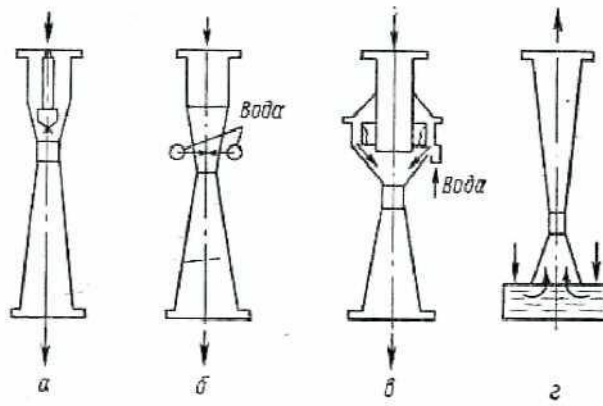


Рис. 16.19. Конструкції труб-розпилювачів: а - центральне (форсунка) підведення рідини; б - периферійне зрошування; в - плівкове зрошування; г - безфорсуночне зрошування.

Витрата води, що розпилюється в СПУ, коливається в широких межах і складає від 1 до 80 л на 100 м повітря, що очищається. Витрата залежить від виду уловлюваного пилу, її концентрації в повітрі, що очищається, а також від конструкції СПУ. Для розпилювання води перед форсунками необхідний натиск 200...300 кПа.

Ефективність уловлювання частинок 5 мкм складає 99,6 %.

СПУ Вентурі застосовують для уловлювання пилу і перегонів чорної і кольорової металургії, пилу харчових виробництв, що не змінюють своїх властивостей при контакті з водою, наприклад, цукровою і ін. при початковій концентрації пилу у вельми широкому діапазоні - 0,05... 100 г/м.

Головною перевагою СПУ Вентурі є простота пристрою і малі габаритні розміри установки.

Серед низьконапірних скрубєрів Вентурі широкого поширення набули так звані коагуляційні мокрі пиловловлювачі (КМП), які є апаратом з суміщеною трубою-коагулятором і циклоном ЦВП. Загальний вид апарату представлений на мал. 6.20.

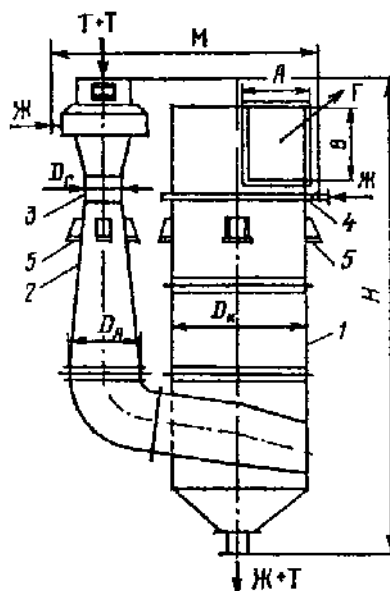


Рис. 16.20. Коагуляційний мокрий пиловловлювач КМП: 1 - камера сепарації; 2 - труба Вентурі; 3 - горловина; 4 - водяний колектор; 5 - опори.

За визначальний розмір КМП прийнятий діаметр горловини D , трубкикоагулятора, який у ряді розмірів міняється від 250 до 1000 мм. Дані апарати можуть працювати в широкому діапазоні витрат газу (7...230 тис. м³/ч) при швидкості газу в горловині 40...70 м/с. Гідравлічний опір при цьому складає 12...35 кПа, а питома витрата води 0,2...0,6 л/м газу. Технічні характеристики типових КМП приведені в табл. 6.10.

Таблица 6.10

Технічні характеристики мокрого пиловловлювача КМП

Тип апарата	Расход газа, тыс. м ³ /ч	Размеры, мм						
		D_e	D_d	A	Я	м	A	B
КМП-2,5	6,5-14,5	250	450	1000	3350	2300	350	620
КМП-3,2	11-24	320	560	1200	4990	2800	410 1	750 1
КМП-7,0	17-33,5	400	700	1500	5630	3540	530	930
КМП-5,0	26-60	500	900	1900	7260	3960	670	1180
КМП-6,3	40-92	630	1120	2300	8650	4670	810	1430
КМП-7,1	50-120	710	1250	2700	9496	5220	950 1	1680 1
КМП-8,0	64-150	800	1400	3000	10086	5810	1250	1860
КМП-10	97-235	1000	1800	3000	10086	5810	1250	1860

Розрахунок ступеня очищення повітря від пилу в КМП заснований на експериментально встановленій залежності діаметру частинок, уловлених на 50%, від питомої потужності контакту їжак, тобто потужності, яка витрачається тільки на контакт газу з рідиною при витраті газу $V = 1$ м³/с.

Питома потужність контакту їжак залежить від витрати газу і зрошуючої рідини, гідравлічного опору і типорозмера апарату КМП. Номограма для визначення величини їжак приведена на мал. 6.21.

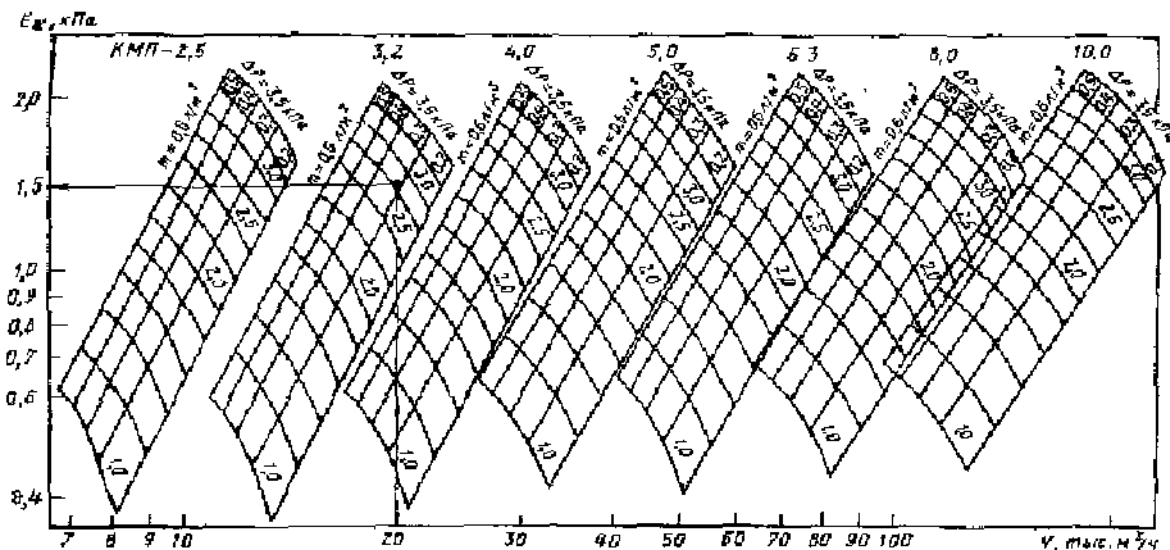


Рис. 16.21. Номограма для визначення питомої потужності контакту КМП.

Потім по величині їжак визначають значення медіанного діаметру частинок, що уловлюються на 50%, тобто $d^0 = 50$. При необхідності по рівнянню (6.13) уточнюють

величину $d^0=50$, тобто знаходять $ddn=50$. Після цього на осі абсцис відкладають відрізок OA від початку координат до значення $d^0=50$ (мал. 6.22).

Побудувавши в логарифмічно вірогідних координатах криву розподілу $D(d)$, по формулі

$$1_{п<т} = \ln(djdl6) = \ln(dsJdm) \quad (6.27)$$

знаходять значення параметра a і наносять цю лінію на номограму (мал. 6.22). Потім відкладають на осі абсцис номограми середні величини діаметрів частинок кожної фракції $d.p$, з координат яких віднімаються відрізки OA , а з отриманих точок абсцис відновлюють ординати до лінії $o-$, які показують ступінь очищення кожної фракції. Загальну ефективність очищення розраховують по рівнянню

$$J_{обш} = \% \frac{\sum i}{i} \quad (6.28)$$

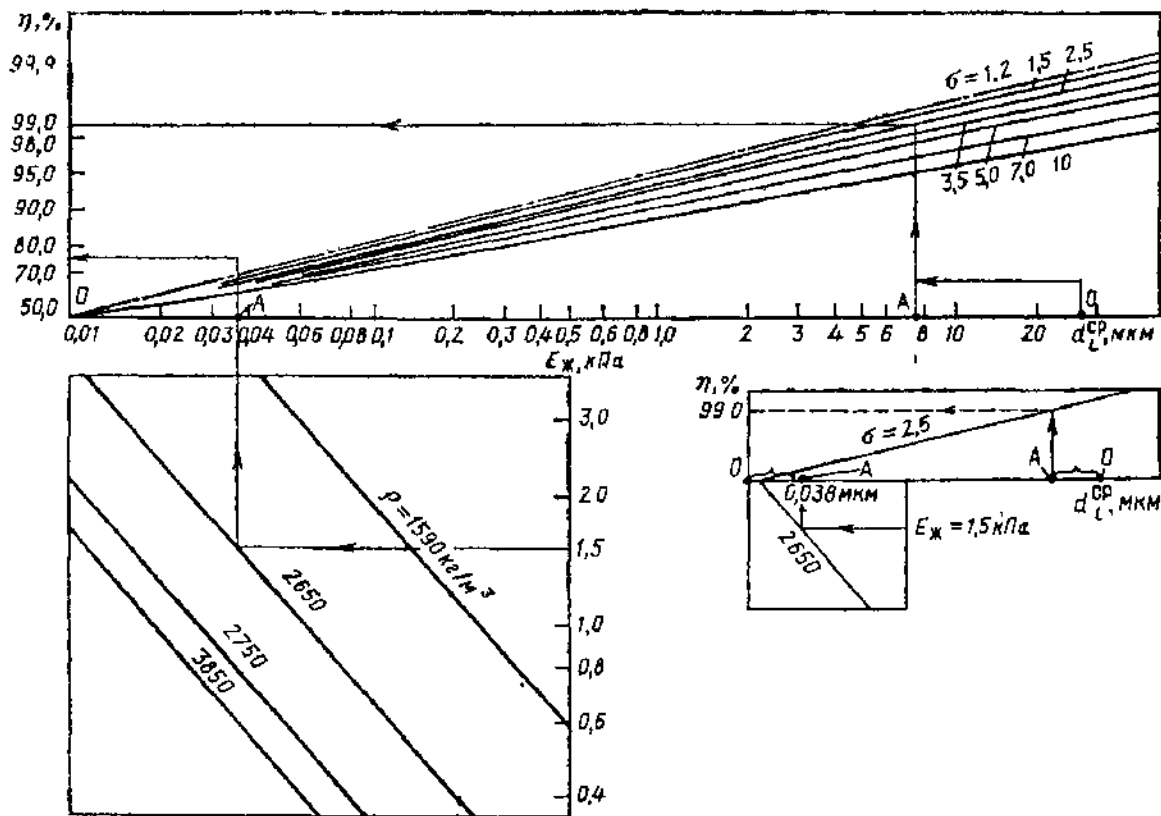


Рис. 16.22. Номограма для визначення ступеня очищення в КМП (щільність частинок коксу - 1590 кг/м, кварцу - 2650 кг/м, вапняку - 2750 кг/м і агломерату - 3850 кг/м).

Гідравлічний опір скрубєрів Вентурі, необхідний для користування номограмою, розраховують таким чином. Зазвичай воно підсумовується з втрат натиску в трубі Вентурі і каплеуловителе, причому основна частина втрат доводиться на трубу Вентурі.

Гідравлічний опір труби Вентурі при подачі в неї зрошуючої рідини описується рівнянням:

$$\Delta p_{в} = \Delta p_{в0} + \Delta p_{вз} \quad (6.29)$$

де $\Delta p_{в0}$ - гідравлічний опір труби Вентурі без зрошування, Па; $\Delta p_{вз}$ - гідравлічний опір труби Вентурі, обумовлений введенням зрошуючої рідини. Па.

Втрату натиску сухої труби визначають по залежності:

$$\Delta p_{в0} = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (6.30)$$

де J - коефіцієнт гідравлічного опору сухої труби Вентурі; $\gamma_{\text{рем}}$ - швидкість газу в горловині (зазвичай приймається по температурі і тиску на виході з труби Вентурі), м/с; $\rho_{\text{г}}$ - щільність газів (за тих же умов), кг/м³.

Коефіцієнт гідравлічного опору J_c для труб Вентурі з круглою і прямокутною горловиною завдовжки 0,15 м (еквівалентний діаметр горловини) приймають в межах 0,12...0,15. При довжині горловини в межах $0,15J > \varepsilon < 1,2 < \rho_{\text{г}}$ цей коефіцієнт розраховують по залежності:

$$J = 0,165 + 0,034 \left(\frac{1}{\gamma_{\text{рем}}} - (0,06 + 0,028/\gamma_{\text{рем}}) M \right) \quad (6.31)$$

де $M = \gamma_{\text{рем}} / \text{изв}$ - число Маху; изв - швидкість звуку в газі, м/с.

Вираз (6.31) справедливий при швидкості газу в горловині до 150 м/с, причому обидві швидкості беруться по температурі і тиску газів на виході з труби Вентурі.

Гідравлічний опір труб Вентурі, обумовлене зрошуючою рідиною, розраховують по формулі:

$$\Delta P_{\text{ж}} = J_{\text{ж}} (0,2 A_{\text{ж}})^2, \quad (6.32)$$

де $J_{\text{ж}}$ - коефіцієнт гідравлічного опору, обумовлений введенням рідини; m - питома витрата зрошуючої рідини, м/м³. Величину коефіцієнта $J_{\text{ж}}$ слід визначати по виразу:

$$J_{\text{ж}} = Li(\frac{0,2}{\gamma_{\text{ж}}}) \left(\frac{P_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}} \right) \gamma_{\text{ж}} \quad (6.33)$$

де $\gamma_{\text{ж}}$ - швидкість крапель рідини на виході з горловини труби Вентурі (зазвичай в 1,5...3 рази менше $\gamma_{\text{рем}}$, менші значення беруть для високих швидкостей газу), м/с.

Значення коефіцієнта A і показника ступеня (1+5) у формулі (6.33) приведені в табл. 16.11.

Таблиця 16.11

Значення коефіцієнта A і показника ступеня (1+5)

Способ подвода орошающей жидкости в трубу Вентури	Скорость газа в горловине, м/с	Длина горловины $l_{\text{г}}$, м	A	$\gamma + B$
Центральный и плечевой подвод	>80 <80	(2,15-12,0) А	1,68 ($\gamma/\gamma_{\text{г}}$), $\gamma_{\text{г}}^{45}$ 3,49 ($\gamma/\gamma_{\text{г}}$) ^{0,266}	1-1,12 ($\gamma/\gamma_{\text{г}}$) ^{0,045} 1-0,98 ($\gamma/\gamma_{\text{г}}$) ^{0,266}
Центральный подвод перед конфузуром или орошение площади над батареей труб	40...150	0,150,	0,215	-0,54
Периферийный подвод в конфузор	>80 <80	0,150.	13,4 1,4	0,024 -0,316
Центральный подвод в конфузор трубы с кольцевым сечением горловины	30...150		0,08	-0.502
Центральный подвод в конфузор трубы оптимальной конструкции	40-150	0,15	0.63	-0.3

Гідравлічний опір каплеуловителя розраховують аналогічно розрахунку ЦВП. Визначивши значення питомої потужності контакту $\dot{E}_{\text{жак}}$ по номограмі (див. мал. 6.21), визначають ступінь або ефективність очищення частинок різного розміру. Метод розрахунку ступеня очищення по номограмі 6.21 аналогічний розрахунку по номограмі на мал. 6.6 для визначення ступеня очищення в циклонах ЦВП. Значення розміру частинки, що уловлюється на 50% ($\eta = 50$), знаходиться на нижній частині номограми залежно від знайденого значення $\dot{E}_{\text{жак}}$ і щільність частинок ($\rho_{\text{г}}/\rho_{\text{ж}}$).

Ступінь очищення газів в скрубєрі Вентурі можна розрахувати по напівемпіричній формулі:

$$\eta = 100(1 - e^{-\text{Stk}}) \quad (6.34)$$

де Stk — критерій Стоксу:

m — питома витрата зрошуючої рідини, л/м³; z — коефіцієнт, що враховує геометричні співвідношення частин труби Вентурі; залежить від довжини L :

4×5^M	ОД	0,2	0,3	0,4
c	1,25	1,45	1,52	1,56

Ефективна довжина горловини $L_{\text{эф}}$ рівна сумі довжин горловини L і початкової ділянки дифузора G . При вугіллі розкриття дифузора $\alpha = 6^\circ$ величина $L' = 0,476 \cdot d_{\text{рЗКВ}}$ ($d_{\text{рЗКВ}}$ — еквівалентний діаметр горловини).

Величину d_K (у мкм), що характеризує середній діаметр крапель рідини, можна визначити по емпіричній формулі:

$$L = 4860 + 163V > 5 \quad (6.35)$$

Гідравлічний опір Арап класичного скрубєра Вентурі визначається як сума (у Па):

$$A_{\text{рт}} = A_{\text{рвор}} + A_{\text{рку}} \quad (6.36)$$

де $A_{\text{рвор}}$ — гідравлічний опір зрошуваної труби Вентурі, Па; $A_{\text{рку}}$ — гідравлічний опір каплеуловителя, Па.

Величина $A_{\text{рвор}}$ рівна:

$$A_{\text{рвор}} = (\lambda + \lambda_{\text{тр}}) \cdot \rho \cdot W_{\text{р}}^2 / 2, \quad (6.37)$$

де $\lambda_{\text{тр}}^{\text{с}}$, $\lambda_{\text{тр}}^{\text{ж}}$ — коефіцієнти гідравлічного опору сухої труби Вентурі і викликаного введенням рідини.

Розроблено 10 типоразмерів скрубєрів Вентурі з кільцевими регульованими перетинами (мал. 6.23), що дозволяють очищати запилені гази при витраті 2...500 тис. м³/ч і гідравлічному опорі від 4 до 12 кПа.

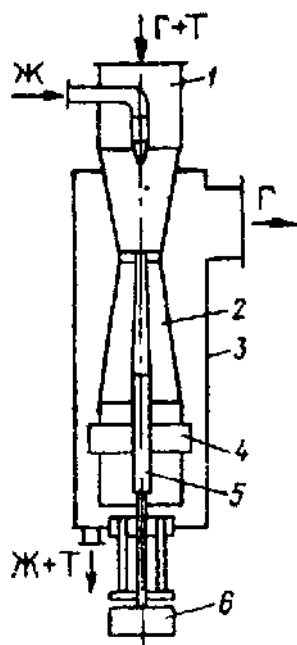


Рис. 16.23. Скрубер Вентурі з кільцевою горловою і конічним обтічником: 1 - патрубок для пилу; 2 - труба-коагулятор; 3 - камера сепарації; 4 - завихорювач; 5 - шток регулюючий; 6 - механізм управління штоком.

Технічні характеристики скрубєрів Вентурі з кільцевим регульованим перетином приведені в табл. 6.12.

Таблиця 6.12

Технічні характеристики скрубєрів Вентурі з кільцевим регульованим перетином

Тип апарата	Расход газа, тыс м /ч	Диаметр горловины, мм	Диаметр каплеуловителя, мм	Скорость газа в каплеуловителе , м/с
СВ-150/90-800	2-7	150	800	1,4-5,0
СВ-210/120-1200	7-15	210	1200	2,3-5,0
СВ-300/180-1600	15-30	300	1600	2,5-5,0
СВ-400/250-2200	30-50	400	2200	3,0-5,0
СВ-900/820-1600 СВ- 1020/920-2000	50-80 80-120	900 1020	1600 2000	6,9-11,0 7,1- 1066
СВ-1150/1020-2400	120-180	1150	2400	7,4-11,0
СВ-1380/1220-2000	160 - 240	1380	2000	7,1-10,6
СВ-1620/1420-2400	240 - 340	1620	2400	7,4-10,4
СВ-1860/1620-2800	340 - 500	1860	2800	7,1-11,3

У скрубєрах чотирьох перших номерів регулювання витрати газу забезпечується за допомогою конічних обтічників з кутом розкриття 7° , а для останніх - еліптичними обтічниками, що дозволяють регулювати швидкість газу в горловині від 85 до 145 м/с. Скрубєри останніх трьох типоразмерів мають здвоєні циклонні каплеуловители.

Розрахунок скрубєрів Вентурі з кільцевим регульованим перетином аналогічний розрахунку КМП.

Розділ 17

Електричне очищення газів

Під електричним очищенням газу розуміють процес, при якому тверді частинки віддаляються з газоподібного середовища під впливом електричних сил.

Фундаментальною відмінністю процесу електростатичного осадження від механічних методів сепарації частинок є те, що в цьому випадку облягаюча сила діє безпосередньо на частинки, а не створюється побічно дією на потік газу в цілому. Це пряме і надзвичайно ефективне використання силової дії і пояснює такі характерні риси електростатичного методу, як помірне споживання енергії і малий опір потоку газу. Навіть найдрібніші частинки субмикрометрового діапазону уловлюються ефективно, оскільки і на ці частинки діє достатньо велика сила. Принципових обмежень ступеня очищення немає, оскільки ефективність може бути підвищена шляхом збільшення тривалості перебування частинок в електрофільтрі.

Енергія, споживана в електрофільтрі, складається з енергії, що витрачається генератором струму високої напруги, і енергії, необхідної для подолання гідравлічного опору при проходженні газу через електрофільтр. Гідравлічний опір електрофільтру при його правильній експлуатації не перевищує 100... 150 Па, тобто значно нижче, ніж у більшості інших пиловловлювачів. Енергія, що підводиться до оброблюваних газів при електроосадженні, витрачається переважно на надання безпосередньої дії на частинки, що облягають. Цим обумовлено багато переваг процесу електрофільтрації.

Електрофільтр відноситься до найбільш ефективних пиловловлюючих апаратів. Ефективність очищення досягає 99,9 % у широких межах концентрацій (від декількох міліграм до 200 г/м³) і дисперсності частинок (до доль мкм) і невисокій витраті електроенергії (близько 0,1...0,5 кВт-ч на 1000 м³ газів). Електрофільтр може знепилювати вологу і корозійноактивну газове середовище з температурою до 500°C. Продуктивність електрофільтрів досягає сотень тисяч м³/ч газу, що очищається.

До недоліків електрофільтрів відноситься їх висока чутливість до підтримки параметрів очищення, висока металоємність і великі габарити, а також висока вимогливість до рівня монтажу і обслуговування.

Застосування електрофільтрації має ряд обмежень. Електрофільтр не може бути використаний для уловлювання пилу, що володіє дуже високим електричним опором. Не можна направляти в електрофільтри вибухонебезпечні газові викиди, у тому числі і такі, які можуть стати вибухонебезпечними в процесі обробки. Не слід використовувати електроочищення, якщо осадження зважених частинок може супроводжуватися електрохімічними реакціями з виходом токсичних продуктів і тим більше - додавати такі (наприклад, SO₃, NH₄ і ін.) для інтенсифікації процесу електрофільтрації.

Електрофільтри, як складніше і дорожче устаткування, що забезпечує тонке очищення повітря, зазвичай komponують з іншими пиловловлюючими пристроями, що встановлюються на початкових ступенях очищення. В результаті підвищується економічність використання електрофільтрів і забезпечується повніше очищення.

17.1. Принцип дії електрофільтрів

У електрофільтрі очищення газів від твердих і рідких частинок відбувається під дією електричних сил. Частинкам повідомляється електричний заряд, і вони під дією електричного поля осідають з газового потоку.

Загальний вид електрофільтру приведений на мал. 7.1.

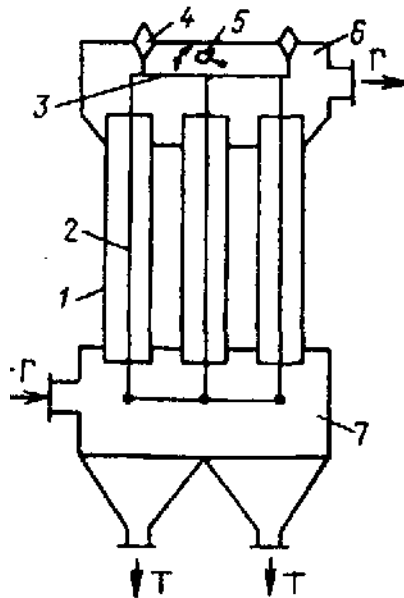


Рис. 17.1. Електрофільтр: 1 - осаджувальний електрод; 2 - коронуючий електрод; 3 - рама; 4 - високовольтний ізолятор; 5 - струшувальний пристрій; 6 - верхня камера; 7 - збірник пилу

Процес знепилювання в електрофільтрі складається з наступних стадій: пилові частинки, проходячи з потоком газу електричне поле, отримують заряд; заряджені частинки переміщуються до електродів з протилежним знаком; осідають на цих електродах; віддаляється пил, що осів на електродах.

Зарядка частинок - перший основний крок процесу електростатичного осадження. Більшість частинок, з якими доводиться мати справу при промисловій газоочистці, самі по собі несуть деякий заряд, придбаний в процесі їх освіти, проте ці заряди дуже малі, щоб забезпечити ефективне осадження. На практиці зарядка частинок досягається пропусканням частинок через корону постійного струму між електродами електрофільтру. Можна використовувати і позитивну і негативну корону, але для промислової газоочистки переважно негативна корона із-за більшої стабільності і можливості застосування великих робочих значень напруги і струму, але при очищенні повітря використовують тільки позитивну корону, оскільки вона дає менше озону.

Основними елементами електрофільтру є коронируючий і осадительный електроди. Перший електрод в простому вигляді є дротом, натягнутим в трубі або між пластинами, другий - є поверхня трубки або пластини, що оточує коронируючий електрод (мал. 7.2).

На коронирующие електроди подається постійний струм високої напруги 30...60 кВ. Коронируючий електрод зазвичай має негативну полярність, осадительный електрод заземлений. Це пояснюється тим, що корона при такій

полярності стійкіша, рухливість негативних іонів вища, ніж позитивних. Остання обставина пов'язана з прискоренням зарядки пилових частинок.

Після розподільних пристроїв оброблювані гази потрапляють в проходи, освічені коронуючими і осадительними електродами, звані міжелектродними проміжками. Що сходять з поверхні коронуючих електродів електрони розганяються в електричному полі високої напруженості і набувають енергії, достатньої для іонізації молекул газу. Молекули газів, що стикаються з електронами, іонізуються і починають прискорено рухатися у напрямі електродів протилежного заряду, при зіткненні з якими вибивають нові порції електронів. В результаті між електродами з'являється електричний струм, а при деякій величині напруги утворюється коронний розряд, що інтенсифікує процес іонізації газів. Зважені частинки, переміщаючись в зоні іонізації і сорбуючи на своїй поверхні іони, набувають зрештою позитивного або негативного заряду і починають під впливом електричних сил рухатися до електроду протилежного знаку. Частинки сильно заряджаються на перших 100...200 мм шляху і зміщуються до заземлених осадительним електродів під впливом інтенсивного поля корони. Процес в цілому протікає дуже швидко, на повне осадження частинок потрібний всього декілька секунд. У міру накопичення частинок на електродах їх струшують або змивають.

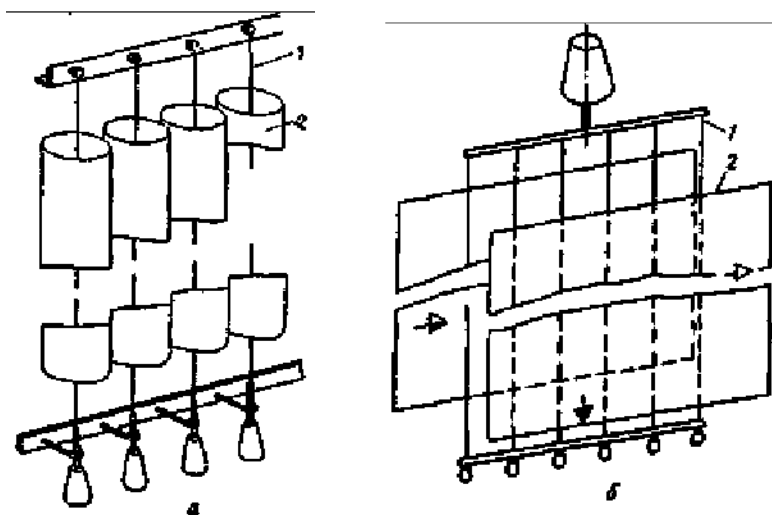


Рис. 17.2. Конструктивна схема електродів: а - електрофільтр з трубчастими електродами; б - електрофільтр з пластинчастими електродами; 1 - коронуючі електроди; 2 - осаджувальні електроди.

Коронний розряд характерний для неоднорідних електричних полів. Для їх створення в електрофільтрах застосовують системи електродів типу крапка (вістря) - площа, лінія (гостра кромка, тонкий дріт) -плоскість або циліндр.

У полі корони електрофільтру реалізуються два різні механізми зарядки частинок. Найбільш важлива зарядка іонами, які рухаються до частинок під дією зовнішнього електричного поля. Вторинний процес зарядки обумовлений дифузією іонів, швидкість якої залежить від енергії теплового руху іонів, але не від електричного поля. Зарядка в полі переважає для частинок діаметром більше 0,5

мкм, а дифузійна — для частинок дрібніше 0,2 мкм; у проміжному діапазоні (0,2...0,5 мкм) важливо обидва механізми.

Заряд частинки, що досягається за час t , визначається наступним рівнянням: $q = 4\pi\epsilon_0\epsilon_{\text{л}}\epsilon_{\text{в}} \left(\frac{g_0}{e + 2} \right) f_1 \frac{4 - g_0}{D_0} \quad (7.1)$

де ϵ - відносна діелектрична постійна частинки по відношенню до діелектричної постійної вакууму; ϵ_0 - проникність вакууму, рівна $8,55 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; E_0 - напруженість електричного поля; g_0 - радіус частинки; D_0 - рухливість газових іонів; e - заряд електрона; N_0 - іонна щільність; t - час.

Рівняння (7.1) може бути переписане в коротшій формі, якщо врахувати, що заряд досягає граничного значення q_s , визначуваного як

$$q_s = 12 \cdot \epsilon_{\text{л}} \cdot \epsilon_{\text{в}} \cdot E_0 \cdot L \quad (7.2)$$

Ас

і що величина t_0 має розмірність часу. Ця величина називається тимчасовою постійною зарядки і позначається символом t_0 . Підставляючи в (7.1) q_s і t_0 отримуємо спрощений вираз:

$$t_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_{\text{л}}\epsilon_{\text{в}}}{g_0} \quad (7.3)$$

Близько 90 % заряду частинка отримує через відрізок часу, рівний t_0 .

На практиці напруженість поля зазвичай лежить в межах 300...600 кВ/м, але може перевищувати 1000 кВ/м в спеціальних системах. Іонна щільність має порядок $10^{13} \dots 10^{14} \text{ м}^{-3}$, але в спеціальних випадках може бути значно вище.

Тимчасова постійна зарядки t_0 складає 0,11 секунд при щоденно малої іонної щільності 10 м^{-3} зменшується до 0,001 з при високому значенні щільності 10^{14} м^{-3} . Якщо прийняти час t_0 для практично повного завершення зарядки, то при помірній щільності іонів 10^{14} м^{-3} час зарядки складе 0,1 с. Цей час відповідає довжині шляху газу в осаджувачі, рівною 0,1...0,2 м, так що зарядка протікає на незначній відстані від входу в електрофільтр.

Напруженість поля, в якому виникає корона, називають початковою або критичною. Її величина багато в чому залежить від параметрів оброблюваних газів і може складати для стандартних умов порядку (15...20) кВ/см. Критична напруга на електродах $U_{w, \text{при}}$ якому з'являється коронний розряд, залежить від їх геометрії. При відомій критичній напруженості поля $E_{w, \text{в/м}}$, величину $U_{w, \text{в}}$, для системи з циліндрового осадительного і розміщеного центрально дротяного коронирую-щего електродів можна підрахувати по формулі:

$$U = E_{w, \text{в}} \cdot R_1 \cdot \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (7.4)$$

а для системи пластинчастих осадительных і дротяних коронирующих електродів - по формулі:

$$V_{\text{в}} = \frac{E_{w, \text{в}} \cdot \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2)}{2 \cdot L} \quad (7.5)$$

де R_1, R_2 - радіуси коронирующего і циліндрового осадительного електродів, м; L - відстань між коронирующим і пластинчастим осадительным електродом, м; $L/2$ - відстань між сусідніми коронирующими електродами, м.

Зазвичай для промислових електрофільтрів значення R_1 складають порядка 0,001...0,002 м, R_2 і $k=0,1 \dots 0,15$ м $= 20 \dots 30$ кВ.

Швидкість дрейфу (переміщення) зважених частинок зростає з напруженістю поля, проте при певному значенні напруги на електродах настає пробій газового проміжку і виникає дуга. Тому оптимальним значенням напруги на електродах вважається максимально близьке до пробійного.

Оскільки електрична міцність газового проміжку при негативній короні вища, ніж при позитивній, в системах очищення промислових викидів подають на коронуючий електрод негативну напругу випрямленого струму. Проте в негативній короні утворюється значна кількість озону, який може ініціювати в атмосфері безліч реакцій, що приводять до її вторинного забруднення. Електрофільтри для систем вентиляції і кондиціонування повітря працюють тільки з позитивною короною.

Ступінь очищення газів від дисперсних домішок в електрофільтрах залежить практично від всіх параметрів газів і зважених частинок, від конструктивних характеристик апаратів, режимів експлуатації і ряду інших чинників. З властивостей дисперсних частинок найочевидніше виявляється вплив питомого електричного опору (УЕС), оптимальне значення якого знаходиться в межах $(106...10^9)$ Ом. Низькоомні частинки легко заряджаються в електричному полі, проте з наближенням до електроду з протилежним знаком перезаряджаються, і між ними починають діяти сили відштовхування. Це служить причиною вторинного віднесення низькоомних частинок, що навіть встигли осісти на електрод. Ще менш сприятливі процеси виникають при очищенні високоомного пилу. Осідаючи на електроди, вони утворюють неоднорідний електроізоляційний шар. По місцю найбільш слабкій ізоляції напруженість поля стає максимальною. Це сприяє утворенню корони з протилежним знаком ("зворотної корони"), різко погіршуючою роботу електрофільтру.

У найбільшій мірі процес уловлювання пилу в електрофільтрі залежить від електричного опору пилу. По величині опору пилу ділять на три групи:

- пил з малим питомим електричним опором. $УЕС < 104$ Ом м. Цей пил, стикаючись з осадительним електродом, миттєво втрачає заряд і набуває заряду відповідно до знаку електроду. В результаті між частинкою і електродом виникає відштовхуюча сила, напрямна частинки в газовий потік. Якщо відштовхуюча сила подолає силу опору середовища, виникає вторинне віднесення, що знижує ефективність уловлювання пилу в електрофільтрі;

- пил з УЕС в межах $104...10^{10}$ Ом без яких-небудь ускладнень осідають на електродах і віддаляються;

- пил із значним $УЕС > 10^{10}$ Ом. Уловлювання цього пилу в електрофільтрі представляє найбільшу складність. Із-за повільної розрядки частинок, що осідають на електроді, на останньому накопичується шар негативно заряджених частинок. Виникаюче електричне поле шару починає перешкоджати подальшому осадженню частинок. Ефективність електрофільтру знижується. Можливе явище зворотної корони, при якому значно збільшується споживаний струм при зниженні напруги на електродах. Пил цієї групи часто утворює на електродах міцний ізолюючий шар, що важко піддається видаленню. Високим питомим електричним опором володіє пил магнетиту, гіпсу, оксиди свинцю і цинку PbO , ZnO , сульфід свинцю PBS .

Зниження УЕС пилу досягається добавкою до газу ряду реагентів, наприклад, сірчистого ангідриду, аміаку, хлоридів кальцію і натрію і ін. Такий же результат дає додавання в газ електропровідних частинок сажі або коксу.

Високий опір ряду пилу може бути знижене охолодженням пылегазового потоку нижче 130°C або його нагріванням зверху 350°C .

Певний вплив на ступінь осадження частинок роблять їх концентрація і дисперсний склад. На вході в електрофільтр частинки можуть мати власний електростатичний заряд, який при їх великій кількості (тобто при високій рахунковій концентрації) може помітно впливати на параметри осадження частинок, знижуючи напруженість електричного поля в апараті аж до замикання корони. Теоретично найменший розмір уловлюваних частинок в електрофільтрах не обмежений. Проте практично не всі частинки в них уловлюються. При дуже високій концентрації високодисперсних частинок (зазвичай субмикрометрового діапазону) настає придушення струму корони об'ємним електричним зарядом. Це приводить до того, що концентрація іонів стає дуже низькою, щоб забезпечити достатню зарядку частинок.

Швидкість дрейфу частинок в електричному полі значною мірою залежить від розмірів частинок. Ця залежність має складний характер зважаючи на відмінність механізмів переміщення частинок різних розмірів. Вважається, що в діапазоні розмірів менше $0,1\ldots 0,3$ мкм швидкість переміщення частинок в електричному полі зменшується з їх укрупненням, в діапазоні від $0,3$ до 20 мкм - збільшується із збільшенням діаметру і потім знов декілька знижується.

З параметрів газового потоку найбільший вплив на осадження роблять вологість і температура. Із зниженням температури зменшується в'язкість газів, унаслідок чого вони чинять менший опір переміщенню зваженої частинки до електроду. З пониженням температури росте стійкість коронного розряду, що дозволяє працювати при вищій напруженості електричного поля. Крім того, з охолодженням оброблюваного потоку росте його відносна вологість, що веде до пониження УЕС частинок унаслідок їх зволоження.

Дуже важливим чинником, пов'язаним практично зі всім процесом електроосадження, є швидкість газового потоку. Від неї безпосередньо залежать час перебування частинок в апараті і його габарити.

При слабкому перебігу газу, дуже великій швидкості газу або поганих умовах утримання може відбуватися віднесення обложених частинок. Частинки, понесені з осадительного електроду, у разі негативної корони придбають позитивний заряд унаслідок емісії. Ці частинки можуть не піддаватися перезарядці або перезарядитися тільки частково. У будь-якому випадку частинки будуть винесені з електрофільтру, що істотно понизить ефективність уловлювання. При швидкостях потоку більше ($1\ldots 1,5$) м/с різко росте вторинне віднесення пилу з електродів. Дуже важливо у зв'язку з цим забезпечити рівномірний розподіл потоку по перетину апарату з тим, щоб локальні швидкості в міжелектродних проміжках ненамного відрізнялися від середньої швидкості.

Певний вплив на ефективність обробки газів роблять конструктивні особливості тих або інших типів електрофільтрів.

Електрофільтри працюють як під розрядженням, так і під надмірним тиском. Система пиловловлювання, в якій застосований електрофільтр, може бути повністю автоматизована.

17.2. Конструкції електрофільтрів

Апарати для очищення газів цим методом називають електрофільтрами. Основними елементами електрофільтрів є: газощільний корпус з розміщеними в ньому коронуючими електродами, до яких підводиться випрямлений струм високої напруги, і осадительними заземленими електродами, ізолятори електродів, пристрою для рівномірного розподілу потоку по перетину електрофільтру, бункери для збору уловлених частинок, системи регенерації електродів і електроживлення.

Конструктивно електрофільтри можуть бути з корпусом прямокутної або циліндрової форми. У середині корпусів змонтовані осадительные і коронующие електроди, а також механізми струшування електродів, ізоляторні вузли, газорозподільні пристрої.

Частина електрофільтру, в якій розміщені електроди, називають активною зоною (рідше - активним об'ємом). Залежно від числа активних зон відомі електрофільтри однозонні і двозонні. У однозонних електрофільтрах коронующие і осадительные електроди в просторовому відношенні, конструктивно не розділені. В двозонних електрофільтрах є чітке розділення. Для санітарного очищення запиленних викидів використовують однозонні конструкції з розміщенням коронующих і осадительных електродів в одному робочому об'ємі. Двзонні електрофільтри з розділними зонами для іонізації і осадження зважених частинок застосовують в основному при очищенні припливного повітря. Зв'язано це з тим, що в іонізаційній зоні відбувається виділення озону, надходження якого не допускається в повітря, що подається в приміщення.

Залежно від напрямку руху газу електрофільтри підрозділяють на горизонтальних і вертикальних. Вертикальні апарати займають в плані значно менше місця, але за інших рівних умов коефіцієнти очищення в них нижчі. Активна довжина поля вертикального електрофільтру співпадає з активною висотою його електродів.

У міру осадження пилу на електродах знижується ефективність пиловловлювання. Щоб уникнути цього явища і підтримки оптимальної ефективності електрофільтрів електроди періодично очищають від пилу струшуванням або промивкою. Відповідно електрофільтри підрозділяються на сухих і мокрих.

До мокрих відносять апарати, що уловлюють рідкі або значно зволожені тверді частинки, а також електрофільтри, електроди яких очищаються самоплив (конденсатом уловленого рідкого аерозоля) або за допомогою змиву частинок, що осіли, рідиною. До сухих відносять електрофільтри, що уловлюють сухі тверді частинки, які видаляють з електродів за допомогою струшування через певні проміжки часу.

Всі мокрі електрофільтри, що знайшли застосування в промисловості, мають вертикальну компоновку. Сухі апарати можуть бути як вертикальними, так і горизонтальними. Переважне застосування серед сухих електрофільтрів мають

апарати з горизонтальним ходом газу горизонтальні багатопільні апарати, в яких газ, що очищається, проходить послідовно через декілька електричних полів.

Залежно від форми осадительних електродів відомі електрофільтри трубчасті і пластинчасті (мал. 7.2). Трубчасті електрофільтри складаються з великого числа елементів, що мають круглий або сотообразное перетин. По осі трубчастого елемента розташований коронируючий електрод. У пластинчастому електрофільтрі є велика кількість паралельних пластин. Між ними знаходяться натягнуті коронирующие електроди.

Форми осадительних і коронируючих електродів можуть бути найрізноманітнішими. Коронирующие електроди можуть набиратися з тонких круглих або товстих шестигранних стрижнів, сталевих пилкоподібних смуг, профільованих стрічок з голчатою выштамповкой. Іноді застосовуються і інші форми. Осадительні електроди сухих фільтрів виконують у вигляді профільованих пластин, жолобів, рідше - коробка з круглими або складними вирізами для кращого утримання обложеного пилу від вторинного віднесення. У мокрих електрофільтрах проблема вторинного віднесення неістотна, тому електроди виконують у вигляді наборів прутков і гладких пластин, що дозволяє легко змивати осад.

Електроди сухих фільтрів струшують зіткненням або за допомогою спеціальних ударно-молоткових механізмів. Зіткнення застосовують в основному для струшування коробчатих електродів. Решта типів коронируючих і осадительних електродів струшує ударами молоткастих механізмів, що обертаються, по ковадлах, прикріплених до цих електродів.

Промивка електродів в мокрих електрофільтрах може проводитися періодично або безперервно. Для періодичної промивки подають велику кількість води або іншої промивної рідини на електроди (у активну зону) при відключеній напрузі. На час промивки секції подачу газу припиняють.

Перетікання неочищеного газу мимо активної зони навіть в невеликій кількості може помітно погіршити ступінь очищення. У горизонтальних фільтрах неактивні зони розташовані над і під електродною системою (включаючи бункери), а також в проміжках між крайніми осадительними електродами і корпусом. У вертикальних пластинчастих фільтрах неактивні проміжки між осадительними електродами і корпусом. У вертикальних трубчастих апаратах неактивні зони можна усунути повністю. У пластинчастих конструкціях зазори необхідні для струшування електродів і дотримання пробійних проміжків. Тому в таких електрофільтрах передбачають клапани (щитки), що створюють лабіринтове ущільнення і знижуючі перетікання газу.

Швидкість газу, що очищається, в активній зоні є однієї з основних характеристик електрофільтру. Найбільшу величину електричного заряду частинки розміром до 1 мкм отримують за час знаходження в електричному полі близько 1 с. Швидкість приймають залежно від конструкції електрофільтру. Так, в сухих електрофільтрах її значення знаходиться зазвичай в межах 0,8... 1,7 м/с. Повинен бути забезпечене рівномірний розподіл швидкості газу, що очищається, по перетину апарату. Для вирівнювання швидкісного поля в електрофільтрі встановлюють ґрати, що направляють лопатки, перфоровані пластини.

Широке розповсюдження в промисловості доручили електрофільтри типу УГ, ЕГА і ін. Ці апарати застосовують на теплових електростанціях, в чорній і

кольоровій металургії, хімічній промисловості, на підприємствах будівельних матеріалів.

Для промислової газоочистки з апаратів вітчизняного виробництва можуть бути рекомендовані електрофільтри загального призначення типів ЕГА, ЕГТ (горизонтальні сухі), УВ, ЕВВ (вертикальні сухі), а також ряд спеціалізованих типів електрофільтрів.

Електрофільтри серії ЕГА призначені для знепилювання неагресивних невибухонебезпечних газових викидів з температурою до 330°C . Корпуси апаратів сталеві, мають прямокутну форму. Корпус апарату сталевий теплоізолюваний, має прямокутну форму і розрахований на розрідження до 4 кПа, в апараті є 3 електричних поля, розташованих послідовно по ходу газу. Осадительні електродами є плоскі полотна, набрані з прутков, а коронируючі - дріт'яні (діаметр проволікай 2,2 мм), натягнуті за допомогою вантажів між осадительними. Довжина одного активного поля 2,5 м, ширина 5,97 м (ширина корпусу 6,0 м), висота 7,74 м, відстань між сусідніми осадительними електродами 260 мм. Уловлений пил віддаляється з електродів механічним струшуванням за допомогою ударів молотків по ковадлах осадительних і рамах підвісу коронируючих електродів. Апарати ОГП виготовлялися чотирипільними з активною висотою 4,5 м, завдовжки 1,5 м, шириною поля 2,17 (ОГП-4-8) і 3,98 м (ОГП-4-16), а ширина корпусу складала 2,20 і 4,0 м. Допустиме розрідження в апараті 1,5 кПа.

Електрофільтри серії ЕГТ (мал. 7.3) призначені для очищення неагресивних, невибухонебезпечних газів з температурою до 450°C .

Їх основна відмінність від апаратів попередніх серій полягає в конструкції осадительних електродів, які аналогічні вживаним в електрофільтрах серії ЕГА. Висота коронируючих електродів 8040 мм. Корпус апарату розрахований на розрідження до 4 кПа. Маркіровка електрофільтрів серії ЕГТ означає: електрофільтр горизонтальний високотемпературний; перше число після букв указує номер (габарит) типорозмерного ряду; друге - кількість полів, третє, - довжину одного поля, м; четверте - площа активного перетину, м^2 .

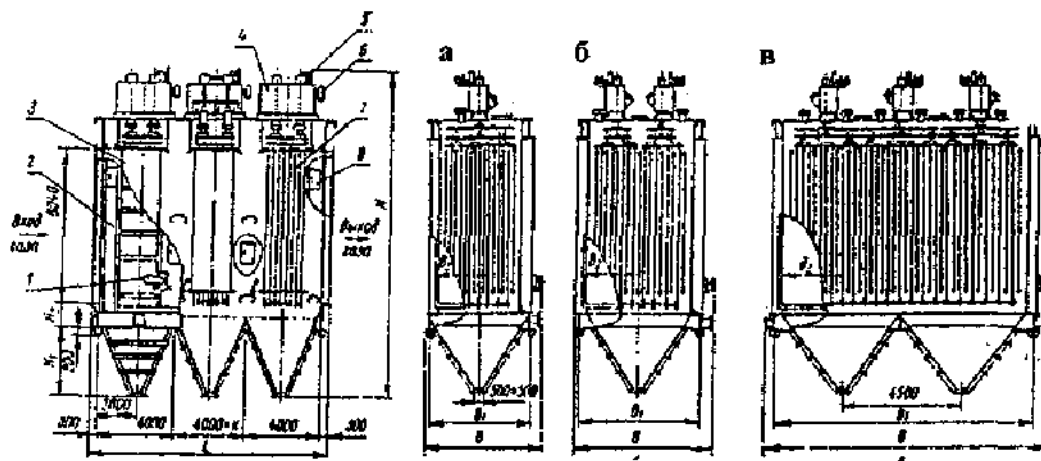


Рис. 17.3. Електрофільтр типу ЕГТ: а - електрофільтри Егт2-3-2,5-20 і Егт2-4-2,5-20; б - електрофільтри Егт2 - 3-2,5-30, Егт2 - 4-2,5-30, ЕГТ 2 - 3-2,5-40 і Егт2 - 4-2,5-40; в - електрофільтри Егт2 - 3-2,5-60 і Егт2 - 4-2,5-60; 1 - механізм струшування осаджувальних електродів; 2 - корпус; 3 - осаджувальний електрод; 4 - ізоляторна коробка; 5 - механізм струшування коронуючих

електродів; 6 - захисна коробка для підведення струму; 7 - коронуючий електрод; 8 - люк обслуговування.

Електрофільтри мазкі Ег2-2-4-37 СРК (мал. 7.4) призначені для очищення газів содорегенерационных котлоагрегатів. Електрофільтри односекционные, з двома послідовними по ходу газу електричними полями. Короніруючі електродами є трубчасті рами, в яких закріплені короніруючі елементи; осадительні електроди виконані у вигляді плоских полотен, набраних з пластинчастих елементів спеціального профілю. Відстань між сусідніми осадительними електродами 300 мм, висота електродів 7200 мм, ширина поля 6000 мм.

Маркіровка електрофільтру означає: електрофільтр горизонтальний; перше число позначає номер типорозміра (габарит) осадительного електроду, друге - кількість полів, третє, - активну довжину поля, м; четверте - площа активного перетину, м². Гідравлічний опір фільтру 200 Па, розрідження в електрофільтрі 3000 Па, пропускна спроможність по газу при швидкості 1 м/с - 37 м³/с, температура газів, що очищаються, 130...250°C, орієнтована ступінь очищення газів содорегенерационных котлоагрегатів 98%.

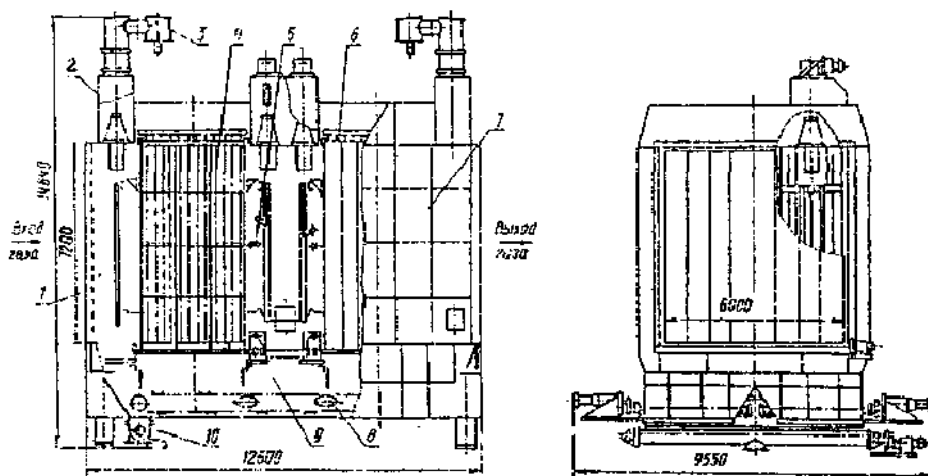


Рис. 17.4. Електрофільтр Ег2 - 2 - 4 - 37 СРК: 1 - газорозподільні решітки; 2 - ізоляторна коробка; 3 - захисна коробка для підведення струму; 4 - коронуючий електрод; 5 - механізм струшування коронуючих електродів; 6 - осаджувальний електрод; 7 - корпус; 8 - скребковий конвеєр; 9 - механізм струшування осаджувальних електродів; 10 - шнековий конвеєр.

Електрофільтри типу УГМ (мал. 7.5) використовуються для знепилювання неагресивних і невибухонебезпечних технологічних газових викидів з температурою до 250°C. Апарати односекционные, з двома електричними полями по ходу газів. Корпуси електрофільтрів прямокутні, теплоізовані, розраховані на розрідження до 4 кПа. Осадительні електроди є плоскі полотна, набрані з пластинчастих елементів спеціального профілю. Відстань між сусідніми осадительними електродами 275 мм. Короніруючі електроди складені із стрічково-голчатих елементів, натягнутих в трубчастих рамах. Висота електродів 3000 мм, ширина корпусу 1500 мм (УГМ-2-3,5) і 3000 мм (УГМ-2-7). Пил з електродів віддаляється механічним струшуванням. Маркіровка електрофільтрів позначає: уніфікований горизонтальний малогабаритний; перше число - кількість полів, друга, - площа активного перетину, м².

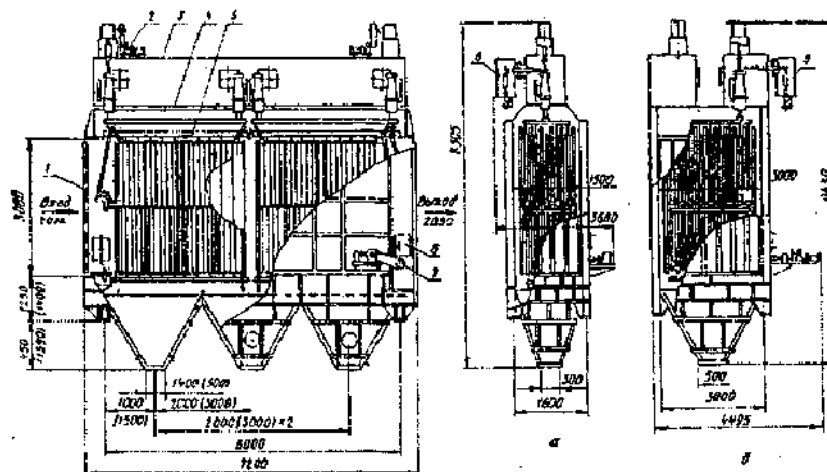


Рис. 17.5. Электрофильтры типа УГМ (выполнения корпуса - П): а - электрофильтр УГМ-2 - 3,5; б - электрофильтр УГМ-2 - 7; 1 - газорозподільні решітки; 2 - механізм струшування коронуючих електродів; 3 - корпус; 4 - осаджувальний електрод; 5 - коронуючий електрод; 6 - люк обслуговування; 7 - механізм струшування осаджувальних електродів; 8 - захисна коробка для підведення струму.

Электрофильтры ЕГ-КЕН предназначены для запыления газов, что содержат высокоомные дисперсные частицы с УЭС в пределах 10 10 Ом м. Степень очищения газов в них может достигать 99,75%. Электрофильтры изготавливаются двух типоразмеров с маркировкой ЕГ-2-3-3,8-17-0,4 КЕН и ЕГ-2-4-2,5-77-05 ЮНИЙ, которая означает: электрофильтр горизонтальный; первое число после букв обозначает типоразмерный (габаритный) номер, второе - количество полей, третье - активную длину поля, м, четвертое, - площадь активного перетина, м², пятая, - модификацию; аббревиатура "КЕН" означает "комбинированные электроды Нипогаз". Аппараты имеют высоту электродов 6000 и 7150 мм, ширину 3200 и 11810 мм, производительность при скорости газов в 1 м/с - 16,7 и 77,8 м³/с, допустимые пределы температур 330 и 250°C соответственно. Гидравлический опрессовочный электрофильтров составляет 200 Па, максимально допустимое разрежение - 5 кПа. Расстояние между соседними осадительными электродами 300 мм. Коронирующие электроды набираются из профилированных стрипов и создают электрическое поле со сложным характером изменения напряженности. Уловленный пыл удаляется механическим встряхиванием электродов.

Ряд конструктивных характеристик горизонтальных электрофильтров, предназначенных для сухого очищения газов от пыли, приведен в табл. 7.1.

Таблица 7.1.

Конструктивные характеристики горизонтальных электрофильтров.

Марка и типоразмер электрофильтра	Площадь активного сечения, м ²	Общая площадь осаждения, м ²	Габариты, м		
			Длина	Ширина	Высота
ЭГА1-10-4-4-2 ЭГА1-10-4-6-2 ЭГА1-10-4-6-3	11	430 645 967	9,26	4,84	10,41
			11,82		11,41
			17,28		11,41
ЭГА1-10-6-4-2 ЭГА1-10-6-4-3 ЭГА1-10-6-6-2 ЭГА1-10-6-6-3	16,5	635 952 952 1430	9,26 13,44	4,89	12,
			11,82		
			17,28		

					41 13,41
ЭГА1-14-7,5-4-3 ЭГА1-14-7,5-4-4 ЭГА1-14-7,5-6-2 ЭГА1-14-7,5-6-3	28,7	1656 2210 1656 2485	13,44 17,62 11,82 17,28	6,15	13, 91 14,91
ЭГА1-20-7,5-4-3 ЭГА1-20-7,5-4-4 ЭГА1-20-7,5-6-2 ЭГА1-20-7,5-6-3	41	2366 3157 2366 3550	13,44 17,62 11,82 17,28	7,95	15,41
ЭГА1-20-9-6-2 ЭГА1-20-9-6-3 ЭГА1-20-9-6-4	49	2827 4243 5660	11,82 17,28 22,74		16,91

Вертикальні сухі електрофільтри типу УВ (мал. 7.6) можуть застосовуватися для знепилювання неагресивних і невибухонебезпечних технологічних газових викидів з температурою до 250°C. Електрофільтри однодолні, використовуються при низькій запиленій (до 30 г/м³), в межах оптимальних значень питомого опору пилу. Зокрема, вони знаходять застосування при очищенні аспіраційного повітря електролізних цехів алюмінієвих заводів.

Електрофільтри можуть бути одно-, двух- або трисекційними. Корпуси прямокутні, теплоізольовані. Секції апаратів розділені суцільними перегородками. Ширина секції апаратів УВ 2х24 і УВ 3х24 складає 6,1 м, останніх - 4,25 м. Рух газів в кожній секції організований від низу до верху. Розрідження в апараті до 3,5 кПа. Осадительніе електроди виконані у вигляді пластинчастих полотен. Відстань між сусідніми осадительними електродами 275 мм. Короніруючі електродами є трубчасті рами, в яких натягнуті стрічково-зубчаті елементи. Активна довжина поля (висота електродів) 7,5 м. Видалення пилу з електродів здійснюється струшуванням. Маркіровка електрофільтру означає: уніфікований вертикальний; перше число після букв - кількість секцій, друга, - площа активного перетину однієї секції, м².

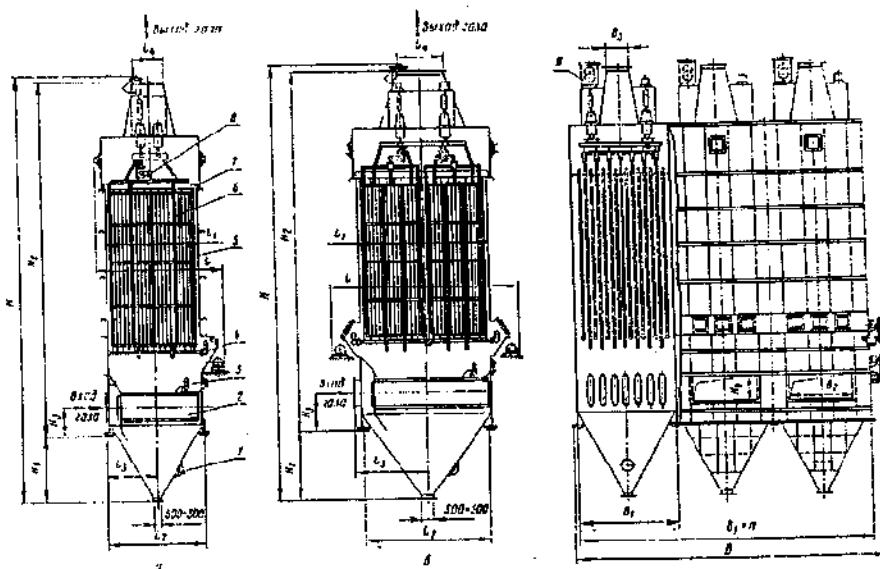


Рис. 17.6. Електрофільтри типу УВ: а - електрофільтри УВ 2х10, УВ 1х16 і УВ 2х16; б - електрофільтри УВ 2х21, УВ 3х21; 1 - люк обслуговування; 2 - газорозподільник; 3 - механізм струшування газорозподільника; 4 - механізм струшування осаджувальних електродів; 5 - корпус;

6 - коронуючий електрод; 7 - осаджувальний електрод; 8 - механізм струшування коронуючих електродів; 9 - захисна коробка для підведення струму.

Деякі конструктивні характеристики сухих вертикальних електрофільтрів приведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2.

Конструктивні характеристики сухих вертикальних електрофільтрів

Марка електрофільтра	Площадь активного сечения, м ²	Общая площадь осаждения, м ²	Габариты, м		
			Длина	Ширина	Высота
УВ2х21,6	1200	5,75	6,69	20,15	
УВ3х32,4	1800	5,75	9,69	20,15	
УВ2х16 УВ2х16 32	900 1800	5,75 5,75	5,19 9,69	20,15 20,15	
УВ2х24 48	2640	8,15	9,69	21,7	
УВ3х24 72	3960	8,15	14,19	21,7	

Мокрі електрофільтри ЕОМ (мал. 7.7) призначаються для уловлювання туманів і крапель сірчаної кислоти з концентрацією (5...20) % о. у присутності слідів оксидів миш'яку, селену, з'єднань фтору. Електрофільтри виконуються вертикальними однопільними і односекційними. Корпус сталевий циліндровий, футерується зсередини на місці монтажу кислототривкими матеріалами.

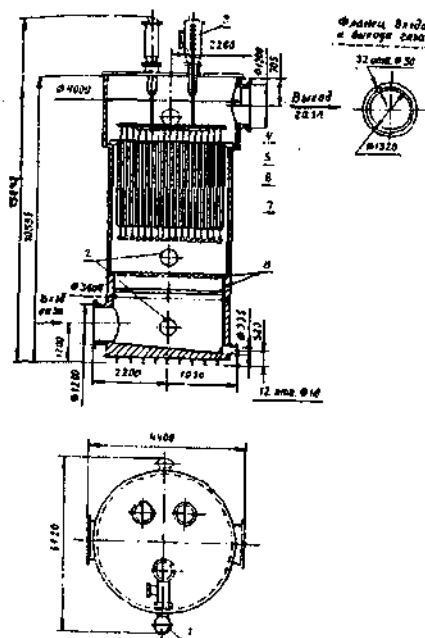


Рис. 17.7. Мокрий електрофільтр типу ЕОМ: 1 - захисна коробка для підведення струму; 2 - люк обслуговування; 3 - ізоляторна коробка; 4 - коронуючий електрод; 5 - осаджувальний електрод; 6 - корпус; 7 - футерування корпусу; 8 - газорозподільні решітки.

Осадительные электроды выполнены из полимерных токопроводящих пластин, что имеют повышенную теплопроводность. Коронирующие электроды изготавливают из оцинкованного дроту. Маркировка электрофильтра означает: электрофильтр вертикальный мокрый.

Степень уловливания речовини, що диспергує, при концентрації на вході від 3 до 5% в перерахунку на 100%-ю сірчану кислоту і двоступінчатому очищенню досягає 99,7%. Допускається робота електрофільтру під розрідженням до 6 кПа. Температура газу, що очищається, 20...45°C. При швидкості газового потоку 1 м/с

пропускна спроможність складає 6,8 м³/с, а опір апарату - близько 100 Па. Площа активного перетину 6,8 м², площа осадження 218 м². Активна довжина поля (висота електродів) 3,5 м, діаметр апарату 3,6 м.

17.3. Підбір і розрахунок електрофільтрів

При виборі типу електрофільтру виходять з витрати, фізико-хімічних параметрів газу і дисперсної домішки, а також умов розміщення фільтру. Основні рекомендації можуть бути зведені до наступного. Мокрі апарати мають вищі коефіцієнти очищення із-за зменшення вторинного віднесення, проте їм присущі і загальні недоліки мокрих способів: необхідність обробки або видалення забруднених стоків і шламу, корозія металевих вузлів апаратів, ускладнення експлуатації очисного пристрою і так далі. Тому для осадження твердих домішок сухі апарати переважно мокрих. З конструкцій сухих електрофільтрів вертикальну компоновку застосовують при недоліку виробничої площі, низькій початковій запыленій і не дуже мелкодисперсної пилі, оскільки час перебування в них набагато менший, ніж в горизонтальних.

Осадження частинок в електрофільтрах відбувається під дією кулонівських або електричних сил на частинки. Ці сили примушують частинки рухатися до осадительним електродів з швидкістю, визначуваної рівністю електричної сили і сили гідродинамічного опору. Швидкість осадження зростає разом з швидкістю міграції частинок, тому остання повинна мати максимальне значення.

Моделі уловлювання залежать від характеру перебігу газу в осаджувачі. У простому випадку частинки переносяться ламинарним потоком. В цьому випадку швидкість руху частинок до осадительному електроду можна розрахувати, використовуючи закони класичної механіки і електростатики: $F_e = qE$ - закон Кулона електростатичної взаємодії;

$F_c = 6\pi\eta r v$ - закон опору Стокса-кенінгема.

$\eta = A \cdot \mu$

Записуючи $F_e = F_c$ вирішуючи рівняння, отримуємо для швидкості міграції

$$v = \frac{qE}{6\pi\eta r} \left(1 + \frac{A}{2} \right) \quad (7.6)$$

де q - заряд частинки; E - облягаюче поле; η - в'язкість газу; r - радіус частинки; X - середня довжина пробігу молекул навколишнього газу; A - безрозмірний параметр, величина якого для атмосферного повітря складає « 0,86.

Повне уловлювання відбувається тоді, коли найповільніша частинка має достатньо часу для того, щоб пройти шлях від короніруючого електроду до осадительного. Умови ідеальної ламинарного течії ніколи не реалізуються на практиці, хоча до них можна наблизитися в деяких типах двоступінчатих осаджувачів. У одноступінчатих фільтрах, зазвичай використовуваних в промисловості, перебіг газу носить складний турбулентний характер.

У малих частинок, що представляють найбільший інтерес для електрофільтрації, швидкість міграції багато менше швидкості газу в осаджувачі. Рух частинок в цих умовах визначається в першу чергу полем турбулентної течії і лише в другу чергу - електричними силами. Частинки осідають тоді, коли вони

наближаються до осадительному електроду і заносяться в ламинарний прикордонний шар, де електричні сили вимушують їх рухатися до осадительной поверхні.

Ступінь очищення газів та інші експлуатаційні характеристики електрофільтру можуть бути достовірно визначені тільки за наявності точної інформації про досвід експлуатації подібних конструкцій в аналогічних умовах. За відсутності необхідних відомостей (отсутствие аналога, складність або дорожнеча пошуку і отримання інформації) можна визначити ступінь очищення розрахунком. Проте розрахункових методик, що дають надійні результати, немає. Тому інформація, отримана розрахунковим шляхом, може використовуватися як попередня і оцінна.

Осадження частинок в умовах турбулентного потоку можна розглянути на основі імовірнісного підходу, який веде до експоненціальної формули для вірогідності захоплення частинки, що рухається в полі електрофільтру. Формула для ефективності уловлювання є має вигляд:

$$s = 1 - \exp(-\frac{A_{\text{ж}}}{v}) \quad (7.7)$$

де $A_{\text{ж}}$ - поверхня осадження фільтру, м²; w_{fl} - швидкість міграції (дрейфу) частинок, м/с; v - швидкість перебігу газу, м/с.

Це рівняння теоретично застосовно тільки до монодисперсних частинок, швидкості міграції яких не перевищують 10...20 % швидкості перебігу газу.

Під швидкістю дрейфу розуміють результуючу швидкість руху зважених частинок в активній зоні електрофільтру. Ступінь очищення може бути підрахована достатньо достовірно, якщо відома швидкість дрейфу, знайдена досвідченим шляхом, наприклад, з досвіду експлуатації подібних електрофільтрів при ідентичних параметрах викидів, в аналогічних умовах і так далі

Теоретичний ступінь очищення газів ϵ в електрофільтрі можна розрахувати по наступних формулах (ϵ %):

- для пластинчастого електрофільтру

$$\epsilon = 100(1 - \exp(-\frac{A_{\text{ж}}}{v})) \quad (7.8)$$

- для трубчастого електрофільтру

$$\epsilon = 100(1 - \exp(-\frac{A_{\text{ж}}}{v})) \quad (7.9)$$

де w_{fl} — швидкість руху частинок до осадительным електродів (швидкість дрейфу частинок), м/с; v — швидкість газів в активному перетині електрофільтру, тобто у вільному перетині для проходження газів, м/с / — активна довжина електрофільтру, тобто протяжність електричного поля у напрямі ходу газів (у вертикальних електрофільтрах співпадає з висотою електродів), м; R — радіус трубчастого осадительного електроду, м; δ — відстань між короніруючим електродів і пластинчастим осадительным електродом (міжелектродний проміжок), м.

В межах застосовності формули Стоксу швидкість w_4 розраховується по наступних формулах (у м/с):

- для частинок діаметром $d_4 > 1$ мкм
- для частинок діаметром $d_4 < 1$ мкм

$$0,1710 - \frac{d_4^2}{18 \eta}$$

$$wd = \frac{E}{4\eta} \quad (7.11)$$

де E — напруженість електричного поля в електрофільтрі, В/м; d — діаметр частинки, м; η , — динамічний коефіцієнт в'язкості газу, Пас;

1AX

$S_{\text{вк}}$ — поправка Кенінгема—міллікена; $S_{\text{вк}} = 1 + A$ — чисельний коефіцієнт, рівний 0,815...1,63; X — довжина середнього вільного пробігу молекул газу, м; $X = 10^{-10}$ м).

Для спрощених розрахунків використовується модифікована формула

$$J = 1 - e^{-K_u A / 3042} \quad (7.12)$$

де K_u - параметр вторинного віднесення; A - безрозмірний параметр, величина якого залежить від співвідношення площ активної і неактивної зон електрофільтру; P - безрозмірний параметр, залежний від співвідношення електричних і аеродинамічних сил.

У разі полідисперсних частинок можна удатися до інтеграції з використанням відомої або гіпотетичної функції розподілу частинок по розмірах для розрахунку ефективності електрофільтру. Хай $y(x)$ буде функцією розподілу по розмірах, тобто $y(x) \cdot \Delta x$ - частка частинок, що мають розмір від $y(x)$ до $y(x + \Delta x)$. Тоді ефективність визначається рівнянням

$$e = 1 - \int_{r(x)} \exp[-A \cdot W d(x)] \cdot dx, \quad (7.13)$$

о , v J

яке можна вирішити аналітично для ряду випадків, що представляють практичний інтерес. Найбільш важливий випадок - логарифмічно нормальний розподіл в умовах, коли переважає польова зарядка.

Ефективність осадження заряджених частинок в електрофільтрах залежить від ряду чинників: електричної провідності і розміру зважених частинок, швидкості газів, їх температури і вологості, стани поверхні осадительних електродів і так далі

Найважливішим чинником, що впливає на розміри електрофільтрів, є час, необхідне для того, щоб уловлювана частинка досягла осадительного електроду

ТОС. Цю величину визначають по співвідношенню:

$$\tau_{\text{ос}} = S / wd \quad (7.14)$$

де δ - відстань між коронуючим і осадительним електродами, м; wd - швидкість дрейфу (середня умовна швидкість руху частинок у напрямку до осадительним електродів), м/с.

Час осадження **ТОС** повинен бути завжди менше загального часу перебування частинок в повітряному потоці, що проходить через електрофільтр (гп), тобто умова нормальної роботи електрофільтру має вигляд:

$$\tau_{\text{ос}} < \tau_{\text{гп}} \quad (7.15)$$

Величина **П** може бути виражена таким чином:

$$\tau_{\text{п}} = l / v \quad (7.16)$$

де l - шлях руху запиленого газу в апараті, м; v - середня витратна швидкість руху газу у фільтрі, м/с.

У електрофільтрах уловлюють частинки розміром декілька мікрон, тому без великої погрішності можна допустити, що швидкість руху частинок з потоком газу рівна середній витратній швидкості газу в апараті. Тоді, прирівнявши праві частини рівнянь (7.14) і (7.16), отримаємо вираз для визначення граничної величини середньої витратної швидкості крізь фільтр:

$$v = wdl/S. \quad (7.17)$$

Для частинок розміром $d_4 = 2...50$ мкм теоретичним шляхом було отримано наступне рівняння для розрахунку швидкості дрейфу:

$$wd = 0,059 - KI^{10} \gamma \chi A'' \quad (7.18)$$

де E - напруженість електричного поля осадження, В/м; η - динамічна в'язкість газу при робочій температурі, Пас

Проте на практиці швидкість дрейфу зазвичай виявляється в півтора-два рази нижче теоретичною. Тоді необхідна площа (m^2) активного перетину електрофільтру може бути знайдена по залежності:

$$S = (1,5...2) [I / (3600 wd)] J / Z. \quad (7.19)$$

По розрахованій величині площі активного перетину підбирають електрофільтр тієї або іншої серії, що серійно випускається.

Ступінь очищення (γ %) може бути розрахована по рівнянню:

$$\gamma = [1 - \exp(-w \cdot l / v)] 100 \quad (7.20)$$

де l -

де l - питома поверхня осадження електрофільтру, м/(м-с).

У загальному випадку для будь-якого електрофільтру

$$f = F/V \quad (7.21)$$

де F - загальна площа осадительных електродів, m^2 ; V - витрата очищуваних газів, м³/с.

При установці електрофільтрів доводиться визначати їх число і підбирати тип агрегатів електричного живлення. Оптимальний режим в електрофільтрі досягається при живленні кожного електричного поля від окремого електроагрегату. Таким чином, число агрегатів відповідає числу полів в електрофільтрі. Типорозмер електроагрегату визначається середньою силою струму, споживаною одним полем електрофільтру, яку підраховують як твір питомого струму корони на площу поверхні осадження одного поля:

$$I_p = i F_1 \quad (7.22)$$

де i - питома сила струму на 1 m^2 поверхні осадження (для пластинчатих електродів її приймають рівною 0,30...0,40 мА/м²); F_1 - поверхня осадження одного поля, m^2 .

Споживана потужність електрофільтру (у кВт):

$$N = i_1 c p K_f \cos \phi / 0,41 - 17 \cdot 10^3 + j j v \quad (7.23)$$

де U - максимальна випрямлена напруга, кВ; K_f - коефіцієнт форми кривої струму (приймають $K_f = 1,2... 1,5$); $\cos \phi$ - коефіцієнт потужності електроагрегату

(0,80...0,90); 1,41 - коефіцієнт переходу від амплітудного значення напруги до ефективного; η - ККД електроагрегату; ΔV - потужності, споживані механізмами струшування і нагрівальними елементами ізоляторних коробок, кВт.

Обчислення орієнтовного ступеня очищення викидів в сухих електрофільтрах від пилу, що має середні значення УЕС, по формулі (7.12), можна виконувати в наступному порядку.

1. Величину K_u при струшуванні осадительных электродів знаходять з виразу:

$$K_u = 1 - 0,275 v_0^{0,35} h^{0,54} \exp(-1,72 - \Delta A_9) \quad (7.24)$$

де v_0, h, m_3 - відносні швидкість газу, висота і пылеемкость осадительных электродів, обчислювані як відносини дійсних значень вказаних характеристик до базових, таких, що приймаються відповідно 1 м/с, 8 м і 1 кг/м².

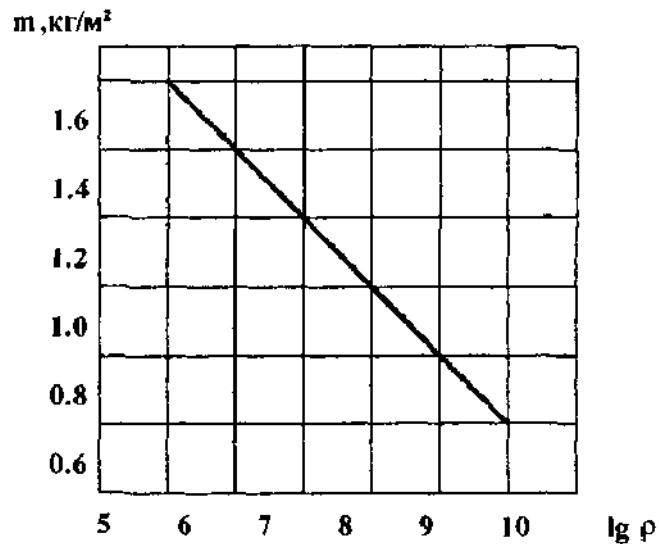
Швидкості руху газів, що рекомендуються, для вітчизняних марок електрофільтрів знаходяться в межах 1...1,3 м/с і вказані в каталогах, також, як і розміри осадительных электродів. Якщо відомий інтервал часу між струшуваннями, то можна по витраті газів і початкової запиленої оцінити пылеемкость электродів. Дійсні значення інтервалів між регенераціями і пылеемкостью электродів можна встановити лише досвідченим шляхом при експлуатації електрофільтру. Неточність їх оцінки є однієї з основних причин зниження надійності розрахунків. Для оцінки величини пылеемкости электродів у окремих видів електрофільтрів можна скористатися даними табл. 7.3.

Таблица 7.3.

Пылеемкость электродів електрофільтрів

Типы и типоразмеры электрофильтров	Количество		Скорость газов, м/с	Начальная запыленность , г/м ³	Интервалы между встряхиваниями, мин
	полей	элементов осадительных м электродов			
ЭГА1-20, ЭГА	3	4	1	90	8
1-30, ЭГА 1-40	2	6	м	м	8
ЭГА (все остальные типоразмеры) ЭГГ	2 2 3 4 3 4 3 4	4 6 4 4 6 6	1 м м м м м 1 м	90 м м м м м II 40 II	8 12 12 16 18 24 30 40
УГГ1-40-3	3	-	1	50	24
ЭГ-КЭН	3 4	-	1 м	90 п	18 16
ЭГ2-2-4-37СРК	2		1	7	60. ..120
УГМ	2		1	60	12
УВ			1	15	30
ЭВВ	-	-	1	20	30

При розрахунку ступеня очищення димових газів енергетичних парогенераторів від золи з УЕС в межах $p = (106... 1010)$ Омм величини пылеемкости осадительных электродів можна приймати по графіку мал. 7.8.



Мал. 7.8. Пиліємкость осадительных электродів

2. Величину конструктивного параметра можна приймати за даними таблиць 7.4 або 7.5, складених для значень відносних площ **f_{omH}** (відносини площі активної зони до площі поперечного перетину корпусу) відповідно. Для електрофільтрів мазкий ЕГА, ЕГТ і подібних до них горизонтальних конструкцій **f_{omH}** можна прийняти рівною 0,9. Значення $\rho_{OYOT}=1$ підходить для трубчастих вертикальних електрофільтрів з незначними зазорами між зовнішньою поверхнею осадительных электродів і корпусом, а також для горизонтальних електрофільтрів з клапанами для перекриття бічних, верхніх і нижніх проміжків між активною зоною і корпусом.

Таблица 7.4.

Значення параметра[^] для конструкцій електрофільтрів с **$f_{omH} = 0,9$** .

к/с	1,0	1,25	1,50	1,75	2,0	2,50	3,0	3,50	4,0	4,50	5,0
0	1,970	1,824	1,710	1,605	1,514	1,330	1,200	1,078	0,986	0,900	0,843
0,05	2,080	1,970	1,850	1,730	1,660	1,480	1,366	1,280	1,206	1,150	1,114
0,10	2,160	2,060	1,970	1,865	1,774	1,620	1,520	1,450	1,394	1,360	1,329
0,15	2,235	2,140	2,055	1,970	1,870	1,745	1,635	1,585	1,542	1,485	1,475
0,20	2,299	2,210	2,129	2,078	1,990	1,885	1,800	1,730	1,663	1,625	1,586
0,25	2,340	2,265	2,185	2,125	2,055	1,950	1,878	1,825	1,750	1,715	1,690
0,30	2,370	2,305	2,230	2,185	2,120	2,025	1,965	1,910	1,850	1,825	1,800
0,35	2,400	2,340	2,275	2,225	2,185	2,095	2,045	1,990	1,940	1,905	1,880
0,40	2,425	2,374	2,315	2,260	2,234	2,170	2,120	2,050	2,020	1,975	1,946
0,50	2,465	2,420	2,370	2,325	2,300	2,250	2,200	2,160	2,130	2,090	2,060
0,60	2,495	2,450	2,415	2,385	2,360	2,290	2,260	2,240	2,210	2,190	2,160
0,70	2,515	2,487	2,450	2,420	2,330	2,330	2,290	2,260	2,230	2,1%	2,170
0,80	2,530	2,516	2,480	2,445	2,416	2,370	2,313	2,270	2,243	2,200	2,177

Таблица 7.5.

Значення параметра[^] для конструкції електрофільтрів з **$f_{omH} = 1$** .

к/а	1,0	1,10	1,25	1,35	1,50	1,75	2,0	2,25	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
0	3,625	3,450	3,275	3,100	2,920	2,650	2,400	2,200	1,950	1,690	1,450	1,269	1,165
0,05	3,898	3,710	3,556	3,400	3,225	2,950	2,744	2,620	2,430	2,200	1,995	1,840	1,730
0,10	4,125	3,985	3,810	3,625	3,475	3,250	3,086	2,915	2,800	2,541	2,350	2,200	2,070

0,15	4,340	4,185	4,025	3,835	3,690	3,470	3,300	3,140	3,030	2,900	2,610	2,470	2,330
0,20	4,451	4,375	4,210	4,040	3,880	3,690	3,486	3,350	3,225	3,023	2,840	2,697	2,590
0,25	4,695	4,435	4,375	4,200	4,040	3,865	3,670	3,555	3,430	3,240	3,025	2,897	2,800
0,30	4,820	4,690	4,540	4,380	4,205	4,035	3,870	3,725	3,515	3,435	3,225	3,090	2,980
0,35	4,960	4,825	4,670	4,500	4,345	4,195	4,025	3,895	3,790	3,610	3,410	3,285	3,165
0,40	5,070	4,945	4,790	4,635	4,480	4,340	4,180	4,050	3,933	3,741	3,560	3,460	3,330
0,45	5,140	5,040	4,900	4,750	4,590	4,470	4,325	4,195	4,055	3,880	3,700	3,590	3,485
0,50	5,215	5,120	4,975	4,840	4,685	4,595	4,440	4,320	4,215	4,000	3,830	3,700	3,610
0,55	5,270	5,190	5,055	4,935	4,805	4,700	4,560	4,445	4,325	4,125	3,950	3,830	3,720
0,60	5,315	5,240	5,125	5,005	4,890	4,790	4,665	4,540	4,430	4,225	4,045	3,930	3,825
0,65	5,365	5,290	5,180	5,070	4,955	4,865	4,750	4,630	4,525	4,330	4,142	4,045	3,930
0,70	5,410	5,330	5,230	5,125	5,020	4,930	4,815	4,700	4,610	4,420	4,230	4,130	4,015
0,75	5,450	5,365	5,270	5,180	5,075	4,970	4,880	4,760	4,660	4,500	4,290	4,170	4,070
0,80	5,475	5,400	5,300	5,220	5,120	5,000	4,910	4,780	4,690	4,560	4,330	4,229	4,135

Значення параметра підбирають по дисперсії пилу заданого складу і коефіцієнту до, визначуваному виразом:

$$1 \quad 10$$

— + —

$$J = 0,5510 - 4\Gamma^{\frac{1}{2}} \quad (7.25)$$

де T , p - температура, До, і тиск, Па (абс), газового потоку; dm - медіанний діаметр частинок забруднювача, м; E - напруженість електричного поля у осадительного електроду, В/м.

Напруженість E поля у осадительного електроду залежить від напруги на електродах, їх розмірів, форми, стану (запиленій, вологості, наявності дефектів і так далі), від параметрів викидів і безлічі інших чинників. Для трубчастого електрофільтру з коронируючим дротяним електродом, встановленим строго по осі циліндрового осадительного, величину E орієнтування можна обчислити за формулою:

$$E = \frac{U}{D_1 - D_2}, \text{ В/м} \quad (7.26)$$

де U - різниця потенціалів на електродах, В; D_1 , D_2 - відповідно внутрішній діаметр осадительного і діаметр коронируючого електродів, м; δ - відстань від поверхні коронируючого електроду до внутрішньої поверхні осадительного електроду, рівне $-\delta$ - $-\delta$, м.

Якщо дійсна величина U невідома, визначають E по максимально можливій напрузі, при якій ще не утворюється дуга, а для високоом-них пилу - зворотна корона. Перше значення можна приймати в межах (40...50) кВ, друге - (30...40) кВ. Для визначення орієнтовної величини E в електрофільтрах з дротяними коронируючими і плоскими осадительними електродами також можна використовувати формулу (7.26), прийнявши за δ відстань між осадительним і коронируючим (або половину кроку між осадательними) електродами і підставивши замість D_1 величину кроку між осадительними електродами.

У більшості сучасних електрофільтрів застосовуються голкові, зубчаті і інші складні форми коронируючих елементів. Зібрані з них електроди створюють в активній зоні неоднорідне електричне поле з аперіодичним градієнтом напруги. Напруженість такого поля міняється від нуля до максимуму по всіх напрямках, і результати її обчислення можуть розглядатися лише як оцінні.

3. Величину параметра P знаходять із співвідношення:

де $J_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - електрична постійна; l - активна довжина електрофільтру, м; δ - відстань між коронуючим і осадительним електродами, м; k_p - коефіцієнт рівномірності газового потоку, $k_p = 0,93$.

Коефіцієнт динамічної в'язкості газу η , Па·с, знаходять з довідкових даних, враховуючи склад і параметри стану газової фази викидів.

Значення k_p можна приймати 0,85 для горизонтальних конструкцій з великим числом газових проходів і 1,0 для вертикальних одноходових конструкцій.

Погрішність по проскакуванню η_y , тобто по віднесенню пилу з електрофільтру, який може бути представлена у вигляді:

$$\eta_y = \frac{Q_{\text{пы}}}{Q_{\text{газ}}} \cdot 100\%, \quad (7.28)$$

не перевищує 20%.

Розділ 18

Вдосконалення процесів і апаратів для пилогазоочистки

Вимоги до ефективності процесів очищення аерозолів, особливо пиловловлювання, постійно підвищуються у міру посилювання нормативних вимог до чистоти атмосферного повітря і повітря в приміщеннях виробничих і цивільних будівель, а також з появою нових технологій, застосуванням нових матеріалів і, отже, з надходженням в повітря відповідних викидів.

Сучасні санітарно-технічні засоби обробки технологічних газових викидів не забезпечують їх повного знешкодження або відновлення первинної якості повітря, використаного у виробничому циклі. Тому відпрацьовані гази завжди вносять до атмосфери частину відходів виробництва. Проте, при визначенні завдань проектування і підборі засобів очищення необхідно виходити з ідеальної моделі, дотримуючись принципу заборони на зміну якості атмосферного повітря в процесі виробництва.

На етапі підбору варіантів і пошуку засобів очищення немає необхідності прагнути до досягнення технічної простоти або економічної доцільності рішення. Творчий пошук рішень стає все більш необхідним проектувальникам, оскільки останнім часом все частіше доводиться розробляти нетипові пристрої, або ж ґрунтовно допрацьовувати існуючі установки унаслідок їх низької ефективності, морального застарівання або неспівпадання параметрів технологічних процесів зважаючи на велику різноманітність останніх.

Прості методи обробки викидів сучасних виробничих процесів швидше за все не забезпечать належного ступеня очищення, що запобігає відчутному збитку навколишньому середовищу. Так, наприклад, прості пиловловлювачі - осадительные камери, жалюзійні ґрати, циклони можуть бути вдало застосовані в двоступінчатій схемі очищення для попередньої обробки викидів. Проте слід було б відмовитися від використання мультициклонов як єдиний засіб очищення димових газів парогенераторів електростанцій. Об'єми викиди теплоенергетичних установок досягають 400...500 м³/с, і тому проскакування забруднювача в 1...2% може представляти серйозну небезпеку навколишньому середовищу, тоді як мультициклони забезпечують ступінь очищення не більш, ніж на 85... 90%.

При постановці завдання проектування повинні бути охоплені всі забруднювачі, які можуть бути присутніми у викидах, для чого необхідно ретельно проаналізувати склад викидів, виділивши нейтральну частину і компоненти, які можуть завдати збитку навколишньому середовищу.

Найбільш складні для очищення викиди, забруднювачі яких представляють багатофазну систему. Оскільки більшість сучасних очисних апаратів не пристосована для одночасного знешкодження дисперсних і гомогенних забруднювачів, то в загальному випадку подібні викиди повинні пройти послідовно 4 стадії обробки: попереднє і тонке очищення від аерозоля і потім попереднє і остаточне знешкодження газоподібного забруднювача. Зокрема, якщо газоподібний забруднювач добре розчиняється у воді, може бути організована попередня обробка викидів мокрими способами, яка дозволить знизити концентрації як дисперсних, так і гомогенних забруднювачів.

При обробці викидів, що містять тверді аерозольні забруднювачі, низьких величин проскакування (1...2% і менш) можна досягти, як правило, тільки двоступінчатим очищенням. Для попереднього очищення можуть бути застосовані жалюзійні ґрати і циклонні апарати (іноді для невеликих викидів – пилоосаджувальні камери), а для остаточної – пористі фільтри, електрофільтри або мокрі пилоосаджувачі.

Рідкі аерозолі (тумани) можуть бути скоагулировані за допомогою зміни параметрів стану (охолодження і підвищення тиску) з метою осадження в подальшому з використанням як правило мокрих способів уловлювання в мокрих скруберах, пористих і електричних фільтрах, в абсорберах.

Мокрі способи очищення твердих і рідких аерозолів мають істотний недолік - необхідність відділення уловленого забруднювача від уловлюючої рідини. З цієї причини мокрі способи слід застосовувати тільки за відсутності інших методів очищення, віддаючи перевагу способам з мінімальною витратою рідини.

Існує декілька напрямів вдосконалення пиловловлювачів і систем пиловловлювання з метою підвищення ефективності очищення повітря (газів) від пилу.

18.1. Спеціалізація апаратів

Універсальних пиловловлювачів, тобто здатних ефективно уловлювати всі види пилу, не існує. Апарат ефективний лише по відношенню до певних видів пилу. При уловлюванні пилу з іншими властивостями він не ефективний і навіть може відбутися порушення його роботи. Перспективними є апарати, спеціально розроблені для уловлювання пилу з певними властивостями.

Наприклад, найбільш перспективними областями застосування тканинних фільтрів є:

- тонке очищення топкових газів, що скидаються в атмосферу, від золи на теплових електростанціях, що спалюють кам'яне вугілля з низьким змістом сірі;
- застосування фільтрів з високою продуктивністю, в яких використовується імпульсний метод регенерації в цементному виробництві, на підприємствах чорної і кольорової металургії, у виробництві абразивів і інших галузей промисловості, де є високі концентрації тонкодисперсного пилу;
- використання тканинних фільтрів для одночасного уловлювання газоподібних забруднювачів (SO_2 , HF і ін.) за рахунок нанесення порошків, що сорбували, на поверхню рукавів з метою забезпечення працездатності фільтрів і санітарного очищення газів.

18.2. Попередня обробка аерозолів

Для забезпечення ефективного очищення відпрацьованого повітря і газів необхідно у кожному конкретному випадку провести підготовку тих, що підлягають очищенню газоповітряних викидів з таким розрахунком, щоб технологічні параметри газів відповідали оптимальним характеристикам газоочисних апаратів. Підготовку відпрацьованого газу до очищення від зважених частинок зазвичай проводять в наступних напрямках

- укрупнення розмірів частинок за допомогою різних механізмів коагуляції;
- зниження концентрації зважених частинок за допомогою попереднього очищення газів в простих неенергоємних апаратах;
- охолодження запилених газів;
- зволоження запилених газів у разі застосування електричної або мокрої систем очищення.

Укрупнений пил може ефективно уловлюватися раніше вживаними або іншими, простішими апаратами, наприклад, циклонами. Укрупнення пилу може проводитися шляхом турбулізації, іонізації або акустичної обробки пылегазового потоку.

Характерним прикладом ефективної турбулізації у поєднанні із зволоженням є обробка пилу в трубі Вентурі.

Є позитивний досвід застосування іонізації і акустичної обробки пылегазового потоку. Раніше використання акустичної обробки стримувала відсутність економічних сирен. Ультразвукові сирени мали низький к.п.д., і їх застосування було нерентабельним. Розробка ефективних сирен чутного діапазону дозволяє ширше застосовувати акустичний метод. Іонізація не вимагає значних витрат і дає добрі результати.

Кондиціонування (підготовка) газів перед очищенням здійснюється або з метою інтенсифікації процесів в основних газоочисних апаратах, або для забезпечення нормальної їх експлуатації.

Існує чотири способи кондиціонування.

1. Охолодження газів. Верхня межа температури визначається в основному матеріалами, з яких виготовлені апарати. Для електрофільтрів це матеріал електродів і корпусу. У деяких типах електрофільтрів температура газів визначається конструкцією коронируючої системи. Жорстка (рамна) конструкція не допускає сильного нагріву, оскільки можливе викривлення. У рукавних фільтрах максимум температури визначається термостійкістю тканини.

2. Підігрів газів застосовується для виключення конденсації пари води і кислот.

3. При зволоженні надмірно сухих газів поліпшуються властивості проміжку між коронируючими і осадительними електродами в електрофільтрах і знижується питомий електричний опір (УЕС) пилу.

4. Введення в газовий потік спеціальних добавок (аміак, сірчаний ангідрид і ін.), що інтенсифікують процес в електрофільтрах.

У практиці газоочистки знаходять широке застосування три перші способи.

Охолодження газу може здійснюватися шляхом підсосу зовнішнього повітря на можливо великому видаленні від апарату, який потребує охолодження газу, або, якщо це неможливо, то відразу після місця підсосу слід розмістити перемішувачий пристрій, наприклад, у вигляді закручувача потоку, турбулізатора або циклону.

Підігрів газу може проводитися шляхом спалювання палива в окремій топці з подальшим вдуванням продуктів горіння в потік газу, що кондиціонує. При проектуванні системи підігріву слід перш за все визначити допустимий інтервал:

$$L' = \text{'шах 'o-}$$

(8-1)

Тут t_0 - температура газу, що очищається, що перевищує на 20...30 °С точку роси; $t^\wedge$ - температура максимально прийнятна по конструктивнотехнологическим міркуваннях.

Витрата гріючого газу, що вводиться в тракт газоочистки, визначається (у м /с) по формулі

$$q_s = \frac{Q_0 J f^\wedge}{\Gamma \cdot \Gamma \quad \text{см}} \quad (8-2)$$

де Q_0 - витрата газу, що очищається, м³/с; t_{0e} - його температура °С; - температура газу після змішення °С; t_{aa} - температура гарячого газу, що подається для підігріву °С.

Поширеним способом кондиціонування газів є використання скруберів повного випаровування. Вони в основному застосовуються перед електрофільтрами, рідше - перед рукавними фільтрами.

Один із способів підвищення ступеня уловлювання аерозольних частинок в мокрих пиловловлювачах - використання ефекту конденсації, що відбувається при охолодженні гарячих газів, заздалегідь насичених водяною парою. При конденсації пара дифундує у бік краплі і захоплює з собою найбільш дрібні частинки. Крім того, частинки обволікаються плівкою конденсату, завдяки чому поліпшується їх контакт з краплями. Конденсація водяної пари сприятливо позначається і на ефективності мокрих пиловловлювачів, поверхню осадження в яких утворюють бульбашки (тарілчасті апарати, газопромиватели з рухомою кульовою насадкою і ін.). Якщо передбачається використовувати ефект конденсації, на тракті газоочистки передбачається пристрій для введення в гарячий потік газу (аерозоля) тонкораспыленной води. Це може бути вертикальний порожнистий скрубер, розрахований на повне випаровування, горизонтальна камера із зрошувачем, або зрошувана ділянка пылегазопровода. Теплове навантаження скрубера визначається по формулі

$$Q = q_{CS} \cdot [c(t_1 - t_2) + (i_1 - i_2)] \quad (8.3)$$

Тут q_{CS} - об'ємна витрата сухих газів, м³/с; c - питома об'ємна теплоємність сухих газів, Дж/(м град); t_1 і t_2 - початкова і кінцева температура газів °С; i_1 і i_2 - питома початкова і кінцева ентальпія водяної пари Дж/м, що містяться в газах ;

$$i_1 = (2480 + 1,967) z_1'; \quad i_2 = (2480 + 1,967) z_2' \quad (8.4)$$

де z_1' і z_2' - початкове і кінцеве вологосодержание сухих газів, кг/м.

Масова витрата води визначається (у кг/с) по формулі

$$q_e = \frac{V_{до з it''-?}}{V_{ис в V_y в>}} \quad (8.5)$$

де $k_{иц}$ - коефіцієнт випаровування води в середовищі даного газу; значення $k_{иц}$ можуть бути прийняті в середньому рівними 0,8...0,85.

Ефективність мокрих апаратів при уловлюванні субмікронних частинок пилу може бути істотно збільшена шляхом попередньої зарядки зважених частинок. Якнайкращі результати при використанні методу електризації в мокрому пиловловлюванні досягаються при різнойменній зарядці частинок і крапель зрошуючої рідини. Позитивний ефект досягається при попередній електричній

зарядці уловлюваних частинок і крапель зрошуючої рідини шляхом розміщення іонізатора в зоні, де починається контакт аерозоля з краплями. Якщо відносна швидкість частинок і крапель невелика, то параметр електростатичного осадження може перевершити параметр інерційного осадження. Якщо аерозоль пропускається через електрофільтр з подальшим доулавлюванням залишку в мокрому апараті, то заряд, отриманий частинками в електрофільтрі, помітно підвищує ефективність доулавлювання.

Як інтенсифікатори пиловловлювання в деяких випадках застосовуються поверхнево-активні речовини, поліпшуючі змочуваність гідрофобних частинок. Змочувачі сприяють розтіканню води у вигляді суцільної плівки по поверхні осадження, і тому частинки, ударившись об поверхню, не можуть бути здуті з неї, як з сухої стінки.

Спеціальними способами інтенсифікації роботи електрофільтрів можна вважати заходи, пов'язані з УЕС пилу. Оптимальним вважається УЕС в межах зразкового від 105 до 1010 Ом див. При менших значеннях УЕС пил миттєво розряджається на осадительних електродах, відривається від них і повторно несеться потоком газу. Високі значення УЕС особливо 10...10 Ом см, навпаки, сприяють формуванню на електродах необтрушуваного шару пилу, що приводить до різних ускладнень, результатом яких є різке падіння ступеня уловлювання. В більшості випадків максимуму УЕС відповідає температура в інтервалі від 100 до 200 °С. Технологічний процес очищення повинен бути розрахований так, щоб електрофільтр працював в температурному режимі, що забезпечує максимально можливе видалення від піку УЕС.

Інтенсифікація електростатичного пиловловлювання досягається також шляхом ліквідації «замикання корони», яка виникає при подачі в електрофільтр висококонцентрованого тонкодисперсного аерозоля. Із-за малої швидкості дрейфу дрібні частинки не встигають відходити від короніруючих електродів і перешкоджають нормальному розвитку корони. Уникнути замикання корони можна застосуванням електродів з короніруючих електродів з фіксованими точками розряду і, в основному, уловлюванням частини пилу для зниження концентрації аерозоля на підході до електрофільтру.

Ті незвичана, ти та, якові неможливо передбачити – втілення класичного опису бажаної жінки, ти та. яка має отримати турботу і опіку, ти втілення ідеального образу – ті що, загалом є неможливим описати словами. Оцінюючи це мені важко зрозуміти ким є я сам, ким я є по відношенню до тобі і до собі. Тепер мені зрозуміло, чому ти хотіла почути відповідь віч на віч, стосовно питання – “що буде далі.?” Я не повинний був задавати таких питань, я абсолютно не мав має рацію чекати від тобі якоїсь відповіді – я сам не зміг сказати тобі нічого суттєвого, важливого, конструктивного, потрібного. Та для міні є ще більший жах в іншому, я хоч і узявши паузу в наших стосунках, але не бачу, що я можу змінити і гірше того – ти це бачила ще в жовтні минулого долі. І хто я після цього всього – остання наволоч, яка руйнує життя молодой, вродливої, розумної, ніжної, фантастичної дівчини. Знаю, що сам мав би це передбачити. уникнути.. не зміг. Знаю, що не мав має рацію. не зміг. Я давно розчарувався в стосунках між чоловіками і жінками. зустрів тобі. зустрів людину. зустрів. і як мені тепер бути. Ті дала годину, а він спливає так швидко як пісок крізь пальці. Не маючи контролю над собою поведжусь

як хлопчисько з 8 класу. Не можу нічого з собою вдіяти, гірше того не травню впливу на годину і обставини. Що б не трапилося зараз я хотів би, щоб ти була поряд. та це не можливо. Знову ж таки, ти давно говорила про це, а я не хотів про це думати. Важко передати тобі все ті, що я думаю, та я спробував. адже ти говорила, що хочеш знать. Після цього, я зрозумів, що ставши близький до думання і почуття – або я з тобою, або не судилося. Якщо б я міг вибирати, то обрав би перше.

Одним із способів інтенсифікації роботи електрофільтрів є введення в газовий потік спеціальних добавок (аміаку, хлоридів натрію і калія), що дозволяє понизити залишкову запилену в 5 разів і понизити УЕС пилу в 2...6 разів.

18.3. Режимна інтенсифікація

Суть цього способу інтенсифікації полягає в тому, що робота газоочисного апарату доводиться до можливо більш напружених режимів, виходячи з властивостей газу, що очищається, і уловлюваного продукту.

Наприклад, в горизонтальному електрофільтрі в кожному полі автоматично підтримується підпробійний режим, тобто електричні параметри, створювані агрегатом живлення, постійно знаходяться на рівні, вище за яке відбуваються іскрові пробої, що часто повторюються, між короніруючими і осадительними електродами. Формування електричних характеристик в розрядному проміжку можна проілюструвати за допомогою формули, виведеної для трубчастого електрофільтру:

$$y = 1 - \frac{I_{\text{аер}}}{I_{\text{чист}}} \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{S_{\text{уд}}} \quad (* \bullet \langle \rangle)$$

де $I_{\text{аер}}$ - струм в чистому газі (за відсутності аерозольних частинок); $I_{\text{чист}}$ - струм в аерозолі; K - коефіцієнт, залежний від діелектричних властивостей частинок; $S_{\text{уд}}$ - питома поверхня аерозольних частинок в одиниці об'єму; R - радіус трубчастого осадительного електроду.

У трубці Вентурі режимна інтенсифікація може бути досягнута збільшенням або швидкості газу в горловині, або питомої витрати зрошуючої рідини.

Режим циклонного процесу можна інтенсифікувати, просто збільшивши швидкість газу в циклоні. Проте при цьому енерговитрати ростуть пропорційно квадрату швидкості газу, а ступінь очищення значно повільніший. До того ж, для кожного типу циклону існує деяка верхня межа швидкості, при перевищенні якого енерговитрати швидко ростуть, а ступінь очищення не тільки не збільшується, але у ряді випадків падає із-за вторинного віднесення частинок.

Режим фільтрації аерозоля через тканину можна зробити більш напруженим, збільшивши швидкість фільтрації, але тільки до меж, вище за яких починається «проскакування» частинок через тканину. При цьому зростає гідравлічний опір фільтру і знижується термін служби тканині.

18.4. Конструктивно-технологічне вдосконалення

На підставі досвіду експлуатації, результатів натурних і експериментальних досліджень вибирають оптимальне співвідношення частин пиловловлювачів, вводять нові елементи, сприяючі ефективнішому пиловловлюванню.

У конструкцію газоочисного апарату вносять удосконалення, сприяючі інтенсифікації процесів, що відбуваються в ній, наприклад, в електрофільтрах

замість гладких дротяних коронируючих електродів застосовують голкові або пилкоподібні. Інтенсивність і рівномірність коронного розряду у голчатих або пилкоподібних електродів значно вищі, ніж у гладких.

Конструктивна інтенсифікація тканинної фільтрації йде по шляху впровадження нових методів регенерації рукавів в рукавних фільтрах (імпульсна, струменева регенерація), створення нових фільтрувальних тканин з ширшим діапазоном застосування і кращими властивостями, що фільтрують, а також доповнення фільтрації попередньою електризацією пилу.

Інтенсифікація циклонного процесу в основному пов'язана з вдосконаленням конфігурації конструктивних елементів циклонів (корпусу, вхідного патрубку, верхньої кришки, вихлопної труби).

У мокрих методах очищення перш за все піддаються конструктивному удосконаленню пристрою для распыла рідини, а також пристрої, від яких залежить характер контакту газу, що очищається, з рідиною. Наприклад, доповнення конструкції пінного апарату стабілізатором піни дозволило в півтора-два рази підвищити швидкість газу в апараті без збитку для ступеня очищення і без порушення структури пінного шару.

Рівномірний розподіл газів по перетину апарату робить істотний вплив на ефективність роботи мокрих пиловловлювачів, що мають невисокий гідравлічний опір (до 400 Па), тобто перш за все на роботу порожнистих скрубєрів. Не менш важливих для нормальної роботи мокрих пиловловлювачів рівномірний розподіл газів по окремих апаратах при їх паралельному з'єднанні.

18.5. Багатоступінчатє очищення

При сучасних вимогах до чистоти повітря одноступінчатє очищення в більшості випадків не може забезпечити його необхідного знепилювання. В основному повинне застосовуватися багатоступінчатє очищення. Для цього необхідний раціональний підбір пиловловлювачів з урахуванням всіх чинників: вимога до якості повітря, властивості, цінність уловлюваного пилу і можливість її використання, наявність енергетичних, водних ресурсів, економічні показники і ін.

Гідравлічний опір установки H_{Σ} визначаємо по формулі:

$$H_{\Sigma} = H_1 + H_{11} \rightarrow$$

де **H_1** - гідравлічний опір 1-го ступеня, який обчислюється за формулою

Вдосконалення пиловловлювання - безперервний процес, що є складовою частиною технічного прогресу. Він обумовлений все зростаючими екологічними і санітарно-гігієнічними вимогами і заснований на досягненнях в багатьох областях науки і техніки.

ДОДАТКИ

Додаток

Нормативи збору, який справляється за викиди основних забруднюючих речовин від стаціонарних джерел забруднення

Назва забруднюючої речовини	Норматив збору, грн/т
Азоту оксид	80
Аміак	15
Ангідрид сірчистий	80
Ацетон	30
Бенз(а)пірен	101807
Ванадію п'ятиокис	300
Водень хлористий	3
Вуглецю оксид	3
Вуглеводні	4,5
Газоподібні фтористі сполуки	198
Тверді речовини	3
Кадмій та його сполуки	633
Марганець та його сполуки	1376
Нікель та його сполуки	3225
Озон	80
Ртуть та її сполуки	3390
Свинець та його сполуки	3390
Сірководень	257
Сірковуглець	167
Стирол	584
Фенол	363
Формальдегід	198
Хром та його сполуки	2147

Додаток

Технічні дані лабораторії “Атмосфера-II”

Контроль метеорологічних параметрів у робочому діапазоні вимірювальних приладів:

швидкість вітру, м/с	1,5-50
напрямок вітру, град	0-360
температура навколишнього повітря, °C	від -30 до +50
відносна вологість, %	від 10 до 100

Середня продуктивність лабораторії, відборів проб/рік до 5000

Обслуговуючий персонал, чол 3

Живлення від мережі перемінного струму:

напруга, В	220
частота, Гц	50

Потужність, кВт не більш 4

Маса, кг не більш 2620

Швидкість пересування по дорогах з удосконаленим покриттям, км/год до 45

Час, хв:

Розгортання (згортання) лабораторії не більш 35 (15)

Додаток**Технічні дані станції “Повітря-1”**

Кількість проб, що відбираються, при триразовому обслуговуванні протягом доби, проб/рік	40000
Кількість одночасно контролюємих забруднювачів у тому числі:	до 11
за допомогою газоаналізаторів	2
при ручному відборі проб на задані газові інгредієнти для послідуєчого хіманаліза	4
при автоматичному відборі проб для послідуєчого хіманаліза	4
при відборі на пилюку	1
Кількість параметрів, що реєструються на друкуєчому обладнанні:	
для датчиків, що входять у комплект станції	4
при додатковій установці газоаналізаторів споживачем	до 11
Кількість вимірюємих метеопараметрів	5
Живлення від мережі перемінного струму:	
напруга, В	380
частота, Гц	50
Споживана потужність, кВт	не більш 10
Габаритні розміри станції в робітничому стані, мм	не більш 2200x4500x6670
Маса станції, кг	не більш 5000

Додаток**Технічні дані електроаспіратора типу ЕА-1**

Діапазон виміру витрати повітря в кожному каналі, дм ³ /хв	0,25-5,0
Максимальне розрідження (перепад тиску), Па	1400
Час відбору проби, хв	20
Основна приведена погрішність виміру обсягу проби, %	±10
Споживана потужність, Вт	не більше 500
Маса, кг	не більше 25

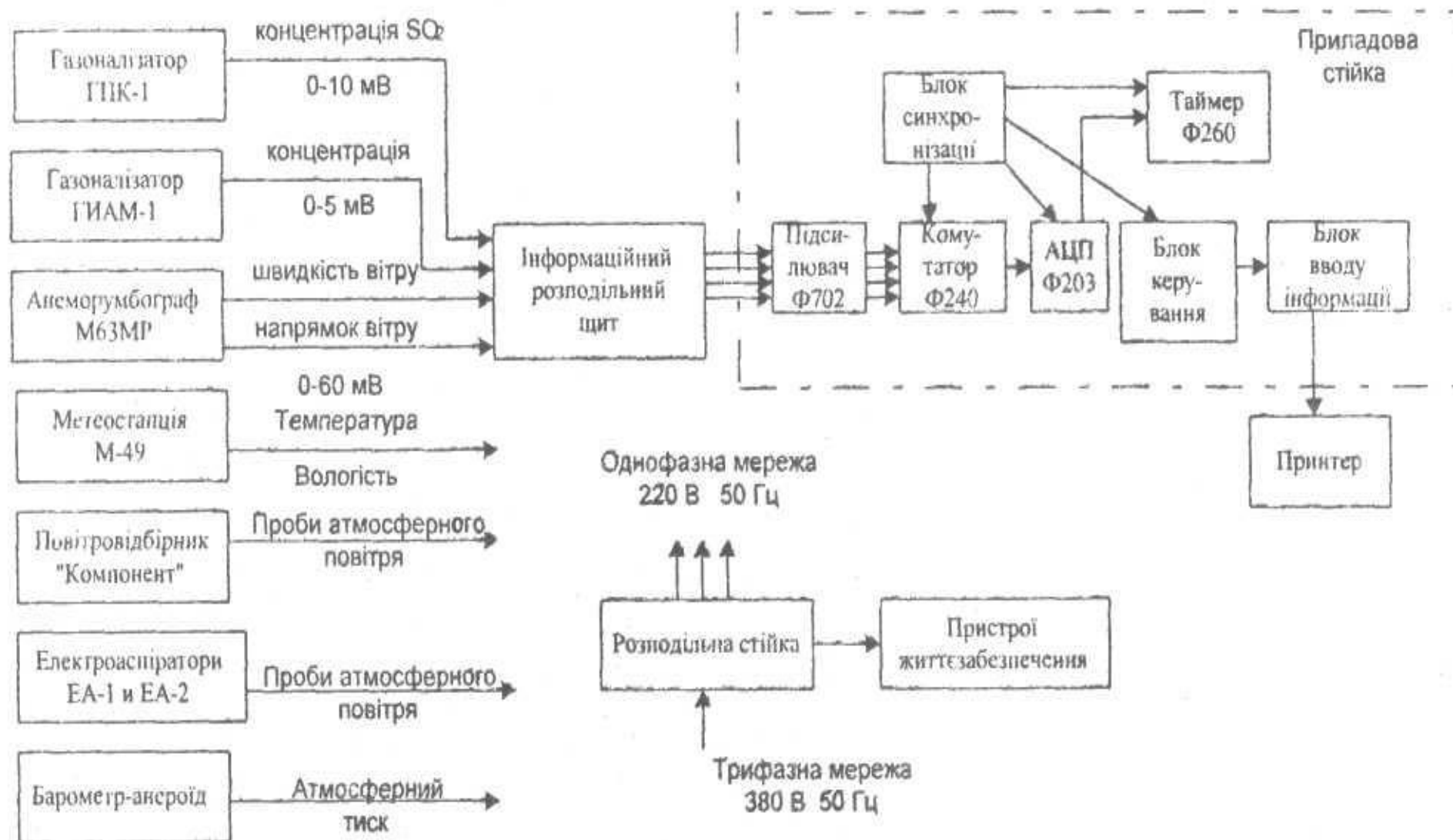
Додаток**Технічні дані електроаспіратора типу ЕА-2**

Максимальна витрата повітря, дм ³ /хв	250-330
Максимальне розрідження, Па	12000
Основна приведена погрішність виміру витрати, %	6
Маса, кг	не більш 35

Додаток**Технічні дані повітровідбірника “Компонент”**

Кількість одночасно відбираємих проб	до 4
Кількість проб, що відбираються в плин циклу	32
Тривалість циклу, годин	5-24
Тривалість відбору проби, хв	5-20
Витрата по одному каналу, дм ³ /хв	0,25-6
Межа припустимого значення погрішності дозуємого обсягу, %	5
Кількість номінальних значень обсягів відбираємих проб	7
Кількість змінних сопел у комплекті виробу	19
Габаритні розміри, мм	не більше 590x540x1090
Маса, кг	не більш 100

Блок-схема структури технічних засобів станції “Повітря-1”



Класифікація засобів відбору проб повітря

Класифікаційні ознаки	Класифікаційні угруповання
Фаза контролюемого забрудника	Засоби відбору паро- і газоподібних забруднювачів
	Засоби відбору аерозолей
Спосіб відбору повітря	Засоби відбору у вакууміровані посудини
	Засоби аспіраційного відбору
Вид середовища, що уловлює	Засоби з твердими сорбентами
	Засоби з рідкими поглиначами
	Засоби з використанням фільтрів
Спосіб регулювання витрати	Засоби ручного регулювання витрати
	Засоби з непрямим автоматичним регулюванням витрати
	Засоби з прямим автоматичним регулюванням витрати
Значення стабілізуємої витрати	Засоби з безперервними значеннями витрати
	Засоби з дискретними значеннями витрати
Ступінь автоматизації робочої програми	Автоматичні засоби
	Папівавтоматичні засоби
	Засоби з ручним керуванням
Кількість проб, що одночасно відбираються	Одноканальні засоби відбору
	Багатоканальні засоби відбору
Вид експлуатації	Засоби відбору особистого користування
	Стаціонарні засоби відбору
	Переносні засоби відбору

Характеристики фільтрів, які використовуються при відборі проб атмосферного повітря (аналітичні фільтри для аерозолей АФА)

Марки фільтрів	Технічні характеристики	Призначення
АФА-В	Виконані у виді кружків із спресованими краями, вирізаними з тканини ФПП-15. Маса фільтрів не залежить від відносної вологості повітря. Випускаються фільтри типів АФА-У-18 і АФА-У-10	Для визначення масової концентрації аерозолей
АФА-Х	Робоча поверхня фільтра 18 см ²	Для мікрохімічних і радіометричних аналізів дисперсної фази аерозолей
АФА-ХА-18	Виготовляються з тканини ФПА-15, що не розчиняється в більшості хімічних розчинників	Для поглинання різноманітних аерозолей із повітря
АФА-ХП-18	Виготовляються з тканини ФПА-15. По властивостям дуже близькі до фільтрів типу АФА-У	Для відбору проб аерозолей при аналізі повітря
АФА-ХС-18	Виготовляються з матеріалу, стійкого до кислот і лугів.	Для аналізу аерозолей, розчинних у лугах
АФА-ХМ-18	Виготовляються з матеріалу, стійкого до кислот і лугів.	Для аналізу нелетких аеродисперсних домішок
АФА-ВП-20	Скорочують тривалість відбору	Для відбору високотоксичних аерозолей

Характеристики витратомірних приладів

Найменування і тип ротаметра	Технічні характеристики
Скляний лабораторний реометр РДС	Реометр із діафрагмою. Швидкість аспірації 100-160 дм ³ /хв. Межі вимірів 0-4, 0-6, 0-10; 0-17; 0-25; 0-40; 0-60; 0-100; 0-160 дм ³ /хв
Скляний лабораторний реометр РКС	Реометр із капіляром. Швидкість аспірації 1 дм ³ /хв. Межі вимірів 0-0,06; 0-0,1; 0-0,25; 0-0,4; 0-0,6 дм ³ /хв
Здвоєний реометр РС-40	Призначений для виміру витрати повітря при відборі проб пилу в рудничних умовах. Швидкість повітря, що проходить через один або два алонжі одночасно, 15-40 дм ³ /хв
Ротаметр скляний РС-3А	Межі виміру по повітрю 0,0063-0,25 м ³ /год
Ротаметр скляний РС-3	Межі виміру по повітрю 0,0063-1 м ³ /год
Ротаметр скляний РС-7	Межі виміру по повітрю 6,3-40 м ³ /год
Ротаметри скляні РСС-5 і РСС-7	Призначені для виміру високоагресивних рідин, газів і парів. Матеріал деталей, що стикаються із вимірювальним середовищем – скло, фторопласт 4. Межі виміру по повітрю 4-10 м ³ /год (РСС-5) і 6,3-40 м ³ /год (РСС-7)
Ротаметри скляні РМ	Призначені для виміру об'ємної витрати потоків повітря, що плавно змінюються. Основна припустима погрішність виміру ±2,5%

Значення коефіцієнтів *b*, *c* для розрахунку швидкості газу при захлинанні

Тип насадки	Коефіцієнт	
	<i>b</i>	<i>c</i>
Трубчата	$0,47 + 1,5 \cdot \lg\left(\frac{d_e}{0,025}\right)$	1,75
Плоскопаралельна, хордова	0	1,75
Пакетна	0,062	1
Кільце Рашига насипом	0,073	1
Кільце Паля	-0,49	1,04
Сідла розміром 25 мм	-0,33	1,04
Сідла розміром 50 мм	-0,58	1,04

Характеристики насадок (розміри дані в мм)

Насадки	$a, \text{м}^2/\text{м}^3$	$\varepsilon, \text{м}^3/\text{м}^3$	$d_e, \text{м}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$
Регулярні насадки				
Дерев'яна хордова (10×100), крок в світу:				
10	100	0,55	0,022	210
20	65	0,68	0,042	145
30	48	0,77	0,064	110
Керамічні кільця Рашига:				
50×50×5	110	0,735	0,027	650
80×80×8	80	0,72	0,036	670
100×100×10	60	0,72	0,048	670
Невпорядковані насадки				
Керамічні кільця Рашига:				
10×10×1,5	440	0,7	0,006	700
15×15×2	330	0,7	0,009	690
25×25×3	200	0,74	0,015	530
35×35×4	140	0,78	0,022	530
50×50×5	90	0,785	0,035	530
Сталеві кільця Рашига:				
10×10×0,5	500	0,88	0,007	960
15×15×0,5	350	0,92	0,012	660
25×25×0,8	220	0,92	0,017	640
50×50×1	110	0,95	0,035	430
Керамічні кільця Паля				
25×25×3	220	0,74	0,014	610
35×35×4	165	0,76	0,018	540
50×50×5	120	0,78	0,026	520
60×60×6	96	0,79	0,033	520
Сталеві кільця Паля:				
15×15×0,4	380	0,9	0,010	525
25×25×0,6	235	0,9	0,015	490
35×35×0,8	170	0,9	0,021	455
50×50×1,0	108	0,9	0,033	415

Додаток

Значення коефіцієнта Генрі E для водних розчинів деяких газів (у таблиці дані значення $E \cdot 10^{-6}$ в мм рт. ст.)

Газ	Температура, °C										
	0	5	10	15	20	25	30	40	60	80	100
Азот	40,2	45,4	50,8	56,1	61,1	65,7	70,2	79,2	90,9	95,9	95,4
Аміак	0,0002	-	0,0003	-	0,0016	-	0,00	0,0016	0,0037	-	-
Ацетилен	0,55	0,64	0,73	0,82	0,92	1,01	1,11	-	-	-	-
Бром	0,0162	0,0209	0,0278	0,0354	0,191	0,056	0,0688	010,1	0,191	0,307	-
Водень	44	46,2	48,3	50,2	51,9	53,7	55,4	57,1	58,1	57,4	56,6
Повітря	32,8	37,1	41,7	46,1	50,4	54,7	58,6	66,1	76,5	81,7	81,6
Двоокис сірки	0,0011	-	0,0016	-	0,0027	-	0,0042	0,0059	0,012	-	-
Діоксид вуглецю	0,553	0,666	0,792	0,93	1,08	1,24	1,41	1,77	2,59	-	-
Кисень	19,3	22,1	24,9	27,7	30,4	33,3	36,1	40,7	47,8	52,2	53,3
Метан	17,0	19,7	22,6	25,6	28,5	31,4	34,1	39,5	47,6	51,8	53,3
Оксид вуглецю	26,7	30,0	33,6	37,2	40,7	44,0	47,1	52,9	62,5	64,3	64,3
Сірководень	0,203	0,239	0,278	0,321	0,367	0,414	0,463	0,566	0,782	1,03	1,12.
Хлор	0,204	0,25	0,297	0,346	0,402	0,454	0,502	0,6	0,731	0,73	-
Етан	9,55	11,8	14,4	17,2	20,0	23,0	26,0	32,2	42,9	50,2	52,6
Етилен	4,19	4,96	5,84	6,8	7,74	8,67	9,62	-	-		-

Додаток

Коефіцієнти дифузії газів і пари в повітрі (за нормальних умов)

Газ	$D_0, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	$D_0, \text{ м}^2/\text{год}$
Азот	13,2	0,0475
Аміак	17,0	0,0612
Бензол	7,7	0,0277
Водень	61,1	0,22
Водяна пара	21,9	0,079
Діоксид сірки	10,3	0,037
Діоксид вуглецю	13,8	0,0497
Диетиловий ефір	7,8	0,028
Кисень	17,8	0,064
Метиловий спирт	13,3	0,0478
Сірчаний ангідрид	9,4	0,034
Сірковуглець	8,9	0,0321
Хлористий водень	13,0	0,0467
Етиловий спирт	10,2	0,0367

Додаток

Атомні об'єми деяких елементів і молярні об'єми деяких газів

Речовина	Атомний об'єм, см ³ /атом	Речовина	Молярний об'єм, см ³ /моль
Br	27,0	J	37,0
C	14,8	H ₂	14,3
Cl	24,6	O ₂	25,6
н	3,7	N ₂	31,2
N у первинних амінах	10,5	Повітря	29,9
N у вторинних амінах	12,0	CO	30,7
N з двома насиченими зв'язками	15,6	CO ₂	34,0
O з двома насиченими зв'язками	7,4	SO ₂	44,8
O у альдегідах і кетонах	7,4	NO	23,6
O у складних ефірах	9,1	N ₂ O	36,4
O у простих ефірах	9,9	NH ₃	25,8
O у вищих простих і складних ефірах	11,0	H ₂ O	18,9
O в кислотах	12,0	H ₂ S	32,9
O у сполуках з S, P, N	8,3	COS	51,5
S	25,6	Cl ₂	48,4
F	8,7	Br ₂	53,2
J	37,0	h	71,5

Примітка. Структурні сталі: бензольне кільце – 15; нафталінове кільце – 30; антраценове кільце – 47,5.

Додаток

Рівноважні дані по адсорбції пари бензолу із їх суміші з повітрям на активному вугіллі різних марок

Марка вугілля	Концентрація бензолу, кг/м ³		Марка вугілля	Концентрація бензолу, кг/м ³	
	в газовій фазі у·10 ³	в твердій фазі x		в газовій фазі у·10 ³	в твердій фазі x
AP-A	0,854	109,0	СКТ	0,085	60,0
	2,560	134,2		0,213	125,6
	5,125	139,8		0,850	174,0
	9,390	143,0		4,270	178,0
	17,060	147,3		12,805	185,1
	25,610	151,2		17,060	188,0
				24,400	193,4
				25,610	198,0
AG-3	0,035	75,0	СКТ-6A	0,000	150,0
	0,427	120,0		1,000	220,0
	2,134	157,5		2,000	263,0
	4,691	170,5		4,000	276,0
	8,540	180,0		5,000	280,0
	17,060	197,5		6,000	284,0
	25,610	215,0		8,000	285,0
				10,000	290,0
				16,000	296,0
				25,000	300,0
				30,000	300,0

Додаток

Значення коефіцієнтів A_1 і B_1 для деяких речовин розчинних у воді

Речовина	Коефіцієнт	
	A_1	B_1
Газ	1,0	
Етиловий спирт	1,24	2,0
Метиловий спирт	19	2,0
Оцетова кислота	1,27	
Вода		4,7
Ацетон		1,15
Неасоційовані рідини		1,0

Додаток

Фізико-хімічні властивості речовин

Рідина	Молярна маса, кг/моль	Густина, кг/м ³	Температура кипіння, °C	Тиск насиченої пари при 20°C, мм рт. ст.
Ацетон C ₃ H ₆ O	58,08	810	56	186
Бензол C ₆ H ₆	78,11	900	80,2	75
Бутилацетат				18
Дихлоретан C ₂ H ₄ Cl ₂	98,97	1250	83,7	65
Мурашина кислота CH ₂ O ₂	46	1220		33,1
Сірковуглець CS ₂	76,13	1290	46,3	298
Спирт метиловий (метанол) CH ₄ O	32,04	800	64,7	97,7
Спирт етиловий C ₂ H ₆ O	46,07	790	78,3	44
Толуол C ₇ H ₈	92,13	870	110,8	22,3
Вуглець чотирьоххлористий CCl ₄	153,84	1630	76,7	90,7
Хлороформ CHCl ₃	119,38	1530	61,2	160
Ефір диетиловий C ₄ H ₁₀ O	74,12	710	34,5	442

Додаток

Межі температур і величини тиску, що рекомендуються, для деяких рідких холодоносіїв

Холодоносіїв	Межі температур, К	Межі тиску, МПа (абс.)
Гелій	1	0,01
Азот	60	20
Аміак	225...310	0,04...1,3
Фреон-11	240...280	0,1013
Фреон-12	230...310	0,04...0,8
Фреон-22	220...300	0,05...0,8
Фреон-30	200...300	0,001...0,1013
Фреон-115	185...225	0,1013
Розсіл хлориду натрію (23% мас.)	240...270	0,1013
Розсіл хлориду кальцію (30% мас.)	230...270	0,1013
Вода	280...320	0,1013
Водний розчин етиленгліколю, % мас.: 30	270...280	0,1013
40	260...280	0,1013
50	245...280	0,1013
60	235...280	0,1013
70	220...280	0,1013

Додаток

Термічний опір δ/λ відкладення на стінці труби при обмиванні її різними середовищами

Омиваюче середовище	δ/λ , м ² ·К/Вт
Вода технічна	1/1800...1/3000
Вода питна	1/3000...1/6000
Вода що дистилює	1/10000...1/12000
Повітря, пароподібні холодоносії	1/3000
Водяні пари, забруднені парами мастил, нафтопродуктів	1/5000
Пари органічних рідин	1/10000...1/12000
Органічні рідини, рідкі холодоносії	1/5000...1/6000
Разсоли	1/3000...1/6000

Додаток

Коефіцієнти густини ρ і теплопровідності λ деяких металів і сплавів

Матеріал	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)
Алюміній	2700	210
Дюралюміній	2800	165
Бронза	8500	ПО
Латунь	8650	85
Мідь	8900	385
Нікель	8900	65
Сталь нелегована	7800	50
Сталь легована	7900	15...30
Титан	4500	15
Чугун	7300	50

Додаток

Межі рекомендованих значень коефіцієнта n для визначення числа Nu в перехідному режимі

$Re \cdot 10^{-3}$	n	$Re \cdot 10^{-3}$	n	$Re \cdot 10^{-3}$	n
2,60	4,65...4,80	5,00	15,50...16,50	8,00	27,00...27,50
2,75	5,10...5,40	5,50	17,60...18,70	8,50	28,90...29,10
3,00	6,00...7,00	6,00	19,50...20,40	9,00	30,40...30,60
3,50	7,90...10,00	6,50	21,40...22,10	9,50	32,00...32,20
4,00	10,25...12,00	7,00	23,20...24,00	9,75	32,40...32,80
4,50	13,00...14,50	7,50	25,00...25,50		

**Температури самозаймання T_c найбільш поширених горючих забруднювачів
відхідних газів промисловості**

Речовина	T_c	Речовина	T_c	Речовина	T_c
Аміак	649	Метан	537	Фталевий ангідрид	584
Ацетон	538	Метиловий спирт	470	Фурфурол	393
Бензол	579	Метиловий ефир	350	Фурфуроловий спирт	490
Бутадієн	449	Метилетилкетон	516	Хлорбензол	674
Бутиловий спирт	367	Нітробензол	496	Циклогексан	268
Вініл ацетат	426	Олеїнова кислота	363	Циклогексанон	495
Водень ціаністий	538	Пропан	468	Етилхлоргідрин	410
Гліцерин	393	Пропілен	504	Етан	510
Дибутилфталат	404	Сірководень	260	Етил ацетат	486
Дихлорметан	640	Скипидар	253	Етилбензол	466
Дихлоретилен	413	Стирол	491	Етилена оксид	430
Гас	254	Толуол	552	Етиленгліколь	413
Крезол	559	Вуглецю оксид	652	Етиловий спирт	426
Ксилол	496	Фенол	715	Етиловий ефір	186

Примітка. В таблиці вказана стандартна температура самозаймання.

ЛІТЕРАТУРА

- Богдановский Г.А. Химическая экология: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1994. – 237 с.
- Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты газоочистки. Учебное пособие. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2006. – 201 с.
- Екологічний менеджмент: Навч. Посібник / За ред. В.Ф. Семенова, О.Л. Михайлюк. – К.: Знання, 2006. – 366 с.
- Экология: Учебник для техн. вузов / Под ред. Л.И. Цветковой. М.: Изд-во АЦБ; СПб.: Химиздат, 1999. – 488 с.
- Охрана окружающей среды / Под ред. С.С. Белова. М.: Высшая школа, 1983. – 264 с.
- Родионов А.И., Клушин Б.Н., Торохешников Н.С. Техника защиты окружающей среды: Учебник для вузов. М.: Химия, 1989. – 512 с.
- Клименко М.О., Прищепа А.М., Вознюк Н.М. Моніторинг довкілля: Підручник. – К.: Видавничий центр “Академія”, 2006. – 360 с.
- Кобецька Н.Р. Екологічне право України: Навч. Посібник. – К.: Юрінком Інтер, 2007. – 352 с.
- Полетаєва Л.М., Сафранов Т.А. Моніторинг навколишнього природного середовища: Начальний посібник. – К.: КНТ, 2007. – 172 с.
- Потіш А.Ф., Медвідь В.Г., Гвоздецький О.Г., Козак З.Я. Екологія: теоретичні основи і практикум. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. 3-тє видання, стереотипне. – Львів: “Новий Світ-2000”, 2006. – 328 с.
- Правознавство: Підручник / Авт. Кол.: Демський С.Е., Ковальський В.С., Колодій А.М. (керівник авт. кол.) та інші; За ред. В.В. Копейчикова. – 5-тє вид., перероб. та доп. – К.: Юрінком Інтер, 2002. – 736 с.
- Сухарев С.М., Чудак С.Ю., Сухарева О.Ю. Техноекологія та охорона навколишнього середовища. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. 2-ге видання, стереотипне. – Львів: “Новий Світ-2000”, 2005. – 256 с.
- Тарасова В.В. Екологічна статистика (з блочно-модульною формою контролю знань). Підручник. – К.: Центр учбової літератури, 2008. – 392 с.