

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

О.С. Волошкіна
І.В. Клімова

ІНЖЕНЕРНІ МЕТОДИ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ

*Конспект лекцій
для здобувачів першого бакалаврського рівня вищої освіти
за освітньо-професійними програмами
Е2 «Екологія та охорона навколишнього середовища» та
G2 «Технології захисту навколишнього середовища»*

Київ 2026

УДК 504
В67

Рецензент Л.О. Василенко, канд. техн. наук, доцент

*Затверджено на засіданні навчально-методичної ради КНУБА,
протокол № 8 від 27 травня 2026 року.*

Волошкіна О.С.

В67 Інженерні методи захисту атмосфери: конспект лекцій /
О.С. Волошкіна, І.В. Клімова. – Київ : КНУБА, 2026. – 76 с.

Розглянуто основні питання екологічної характеристики атмосфери, джерела впливу антропогенних забруднювачів, теорію розсіювання та інженерних розрахунків розсіювання, теоретичні основи сучасних методів очищення вентиляційних та технологічних викидів. Наведено основні положення щодо нормування забруднення згідно із законодавством і санітарними нормами України. Надано рекомендації щодо використання технологічних рішень.

Призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за освітньо-професійними програмами Е2 «Екологія та охорона навколишнього середовища», G2 «Технології захисту навколишнього середовища».

УДК 504

© О.С. Волошкіна, І.В. Клімова, 2026

© КНУБА, 2026

ЗМІСТ

Вступ.....	5
Лекції 1-3.....	6
Тема 1. Атмосфера як газова оболонка Землі.....	6
1.1. Еволюція та хімічний склад атмосфери.....	6
1.2. Будова атмосфери.....	9
1.3. Рухливість атмосфери.....	11
1.4. Енергетичний баланс Землі та атмосфери.....	12
1.5. Хмари в атмосфері, їх взаємодія з газами і аерозолями.....	15
Запитання для самоконтролю.....	16
Лекції 4-8.....	17
Тема 2. Забруднювачі атмосфери, їх перетворення і розповсюдження	17
2.1. Джерела забруднення атмосфери.....	17
2.2. Головні забруднювачі атмосфери.....	18
2.3. Вплив забруднювачів повітря на навколишнє середовище.....	21
2.4. Розсіювання забруднювачів в атмосфері.....	25
2.5. Інженерний розрахунок концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі	28
Запитання для самоконтролю.....	32
Лекція 9.....	33
Тема 3. Нормування забруднення атмосфери	33
3.1. Моніторинг якості атмосферного повітря.....	33
3.2. Оцінка рівня забруднення атмосферного повітря.....	34
Запитання для самоконтролю.....	41
Лекція 10.....	42
Тема 4. Основи інженерного захисту атмосфери.....	42
4.1. Санітарно – захисні зони (СЗЗ).....	42
4.2. Потужність джерел викидів.....	44
Запитання для самоконтролю.....	46
Лекція 11.....	47
Тема 5. Пилоочищення.....	47
5.1. Дисперсний склад (ДС) пилів.....	47
Запитання для самоконтролю.....	51
Лекції 12, 13.....	52

Тема 6. Основи механіки аерозолів.....	52
6.1. Відносно рівномірний рух, взаємодія часток з газовим (повітряним) потоком.....	52
6.2. Нерівномірний рух.....	54
6.3. Інерція прямолінійного руху.....	55
6.4. Дифузійні процеси.....	56
6.5. Механізм седиментації.....	57
6.6. Осадження в полі дії електричних сил.....	57
Запитання для самоконтролю.....	58
Лекція 14.....	59
Тема 7. Пилувловлювачі і фільтри.....	59
7.1. Циклони.....	60
7.2. Ефективність пилувловлювачів.....	61
7.3 Фільтри.....	61
Запитання для самоконтролю.....	62
Лекції 15-17.....	63
Тема 8. Засоби очищення газових викидів.....	63
8.1. Основні положення щодо очищення газових викидів.....	63
8.2. Абсорбційний метод очищення газових викидів.....	64
8.2.1. Рівновага в системі газ-рідина.....	66
8.2.2. Класифікація технологічного обладнання для абсорбційного очищення газових викидів	68
8.3. Адсорбційний метод очищення газових викидів.....	72
Запитання для самоконтролю.....	74
Список літератури.....	75

ВСТУП

У сучасних умовах інтенсивного розвитку промисловості, транспорту та енергетики проблема забруднення атмосфери набуває особливої актуальності, оскільки антропогенне навантаження призводить до суттєвих змін її хімічного складу та фізичних властивостей.

Бакалаври, магістри екології в ході професійної діяльності беруть участь в організації і здійсненні інженерних заходів з охорони навколишнього середовища і забезпечення збалансованого природокористування. Поглиблена екологічна підготовка, знання і вміння в галузі природоохоронних технологій дають змогу спрямовувати діяльність будівельного та інших промислових комплексів в межі зменшення впливів на біосферу і сприяння відновленню природних ресурсів. Дисципліна вивчається після дисциплін фундаментальної і природознавчої підготовки.

Конспект лекцій спрямований на формування у майбутніх фахівців комплексного підходу до вирішення екологічних проблем, пов'язаних із забрудненням атмосферного повітря, та набуття практичних навичок у сфері його охорони.

Метою цього конспекту лекцій є формування у студентів системних знань про будову, склад і властивості атмосфери, джерела та наслідки її забруднення, а також про сучасні методи контролю і захисту атмосферного повітря від шкідливих викидів. Особливу увагу приділено інженерним аспектам оцінки та зниження негативного впливу забруднювачів на довкілля.

Основними завданнями конспекту є:

- ознайомлення з еволюцією атмосфери, її структурою та основними фізико-хімічними процесами;
- вивчення джерел утворення забруднювачів і закономірностей їх поширення в атмосфері;
- опанування методів оцінки якості атмосферного повітря та принципів його нормування;
- засвоєння основ інженерного захисту атмосфери, включаючи методи очищення газових викидів і пиловловлювання;
- формування навичок виконання інженерних розрахунків концентрацій шкідливих речовин.

Матеріал конспекту лекцій орієнтований на здобувачів технічних та екологічних спеціальностей і може бути використаний як для аудиторної, так і для самостійної роботи. Наявність запитань для самоконтролю сприяє закріпленню теоретичних знань та розвитку аналітичного мислення.

Лекції 1-3

Тема 1. Атмосфера як газова оболонка Землі

1.1. Еволюція та хімічний склад атмосфери

Атмосфера є однією з необхідних умов виникнення та існування життя на Землі. Вона бере участь у формуванні клімату на планеті, регулює її тепловий режим, сприяє перерозподілу тепла біля поверхні. Частина променистої енергії Сонця поглинається атмосферою, а інша енергія, досягаючи поверхні Землі, частково йде в ґрунт, водойми, а частково відбивається в атмосферу.

Атмосфера оберігає Землю від різких коливань температури. За відсутності атмосфери і водойм температура поверхні Землі протягом доби коливалася б в інтервалі 200°C . Завдяки наявності кисню атмосфера бере участь в обміні і кругообігу речовин у біосфері.

У сучасному стані атмосфера існує сотні мільйонів років, все живе пристосоване до строго певного її складу. Газова оболонка захищає живі організми від згубних ультрафіолетових, рентгенівських і космічних променів. Атмосфера оберігає Землю від падіння метеоритів. У атмосфері розподіляються і розсіюються сонячні промені, що створює рівномірне освітлення. Вона є середовищем, де поширюється звук. Через дії гравітаційних сил атмосфера не розсіюється у світовому просторі.

Загально визнано, що Сонячна система сконденсувалася з міжзіркової хмари пилу та газу, віднесеної до сонячної туманності, близько 4-6 млрд років тому [1]. Атмосфери планет з твердою поверхнею (Земля, Марс, Венера та ін.) утворилися в результаті вивільнення летких сполук з планетного тіла. Вважається, що первинна атмосфера Землі являла собою суміш вуглекислого газу CO_2 , азоту N_2 , водяної пари H_2O , слідової кількості водню H_2 та інших сполук – суміш, подібна до тої, яка імітується під час виверження сучасних вулканів.

Більшість водяної пари, яка вивільнилася з планетного тіла, сконденсувалася з атмосфери й утворила океан. Первинний діоксид вуглецю після розчинення у воді згодом став основою донних відкладень карбонатів і карбонатів порід осадів.

Азот N_2 як такий, що не розчинявся або слабо розчинявся і не конденсувався, накопичувався в атмосфері і став найбільш презентабельним за минулий екологічний час. Рання атмосфера складала відновну суміш, в той час як сьогоднішня атмосфера – окисна. Значне зростання вмісту кисню O_2 є результатом фотосинтезу, і сучасний вміст кисню був досягнутий орієнтовно 400 млн років тому. Рівень кисню підтримується балансом між продуктивністю фотосинтезу і використанням для дихання і розкладання органічних сполук вуглецю. Без поновлення фотосинтезом кисень атмосфери міг би бути використаним для окиснення органічного вуглецю за 20 років, і його залишок складав би 1 %.

Без вуглецю органічних сполук вивітрювання скель седиментаційного походження використання залишкового кисню могло б тривати 4 млн років. Хімічний склад сучасної атмосфери представлений в табл. 1 [1].

Баланс головних складових підтримується в геологічному часі біосферою, поглинанням і вивільненням з земної кори, а також дегазацією глибинних шарів. Вода, сконцентрована в нижній тропосфері, досягає концентрації 3% і контролюється балансом між конденсацією і випаровуванням. Вміст слідових газів констатувався протягом двох останніх століть і пов'язаний із розвитком науки і засобів визначення концентрації у вигляді мольної частки нижче ніж 10^{-6} , або 1 частки на мільйон об'ємних одиниць: 1 part per million (ppm) by volume. Інноваційні технології сучасного періоду дають здатність визначення на рівні 10^{-12} , або 10^{-12} parts per trillion (ppt) by volume.

Таблиця 1

Хімічний склад сучасної атмосфери

Газ	Молекулярна вага	Об'ємні %%	Часток на мільйон об. одиниць (ppmv)	Цикл	Характеристика
N ₂	28,013	78,084	780840,0	Біологічний та мікробіолог.	Баланс в сист. коло-обігів
O ₂	32	20,946	209460,0		
Ar	39,948	0,934	9340,0	Циклу немає	Накопич. впродовж історії Землі
Ne	20,179	0,0018	18,0		
Kr	83,8	0,00011	1,1		
Xe	131,30	0,000009	0,09		
CH ₄	16,043	0,000172	1.72	Антропоген. , біоген. та хімічний	
CO ₂	44,010	0,0355	355	Антропоген. та біоген.	
CO	28,010	0,000006 - 0,000012	0,06 (Півд. півк.) 0,12 (Півн. півк.)	Антропоген. та хімічний	
H ₂	2,016	0,000058	0,58	Біоген. та хімічний	
N ₂ O	44,012	0,0000311	0,311		
NO	30,006		10 ⁻⁶ ...	Антропоген. та хімічний	
NO ₂	46,006		10 ⁻²		
O ₃	48,0	0...3	10 ⁻² ...10 ⁻¹	Хімічний, біоген. та фізико-хімічний	
H ₂ O	18,015		Змінний вміст		
He	4,003	0,00052	5,2	Фізико-хімічний	

1.2. Будова атмосфери

Атмосфера підрозділяється на окремі шари (рис. 1). Нижня атмосфера в складі тропосфери і стратосфери займає простір до верхньої межі стратосфери на висоті близько 50 км. Верхня атмосфера в складі мезосфери, термосфери і екзосфери сягає висоти більше 500 км (орієнтовано до 20 тис. км).

Нижній шар – тропосфера – від поверхні до тропопаузи має висоту від 10 до 15 км залежно від широти і пори року (10-12 км на полюсах і 16-18 км в районі екватора) [1; 2]. Вивчення нижньої атмосфери належить до метеорології. Слово «тропосфера» походить від грецького слова **tropos**, що означає обертання, тропосфера – це зона безперервної турбулентності і перемішування. Шар, який обмежується поверхнею землі, називається примежовим планетарним шаром і має потужність 1...3 км. Вище знаходиться вільна тропосфера (або вільна атмосфера). В межах тропосфери температура зменшується від 10...20°C до -56°C. У стратосфері температура знову підвищується поступово до -2°C. Вертикальне перемішування тут повільне.

В мезосфері по висоті температура знижується до -92°C, цей шар швидко вертикально перемішується.

Термосфера характеризується поступовим підвищенням температури до +1000...1200°C. На висоті 500 км шар характеризується швидким вертикальним перемішуванням. Розподілення температури по висоті пояснюється поглинанням різних частин спектра сонячного випромінювання. Приблизно до висот 200 км поглинається короткохвильова частина з довжиною хвилі $\lambda < 100$ нм. Поглинають N_2 , O_2 , $[O]$, $[N]$, O_2^+ , NO^+ . У верхній мезосфері і нижній термосфері відбувається фотоіонізація. Ця частина атмосфери називається іоносферою. До висот ~50 км відбувається поглинання частини спектру з довжиною хвилі $100 \text{ нм} < \lambda < 330 \text{ нм}$. До поверхні доходить енергія випромінювання з довжиною хвилі $\lambda > 330 \text{ нм}$.

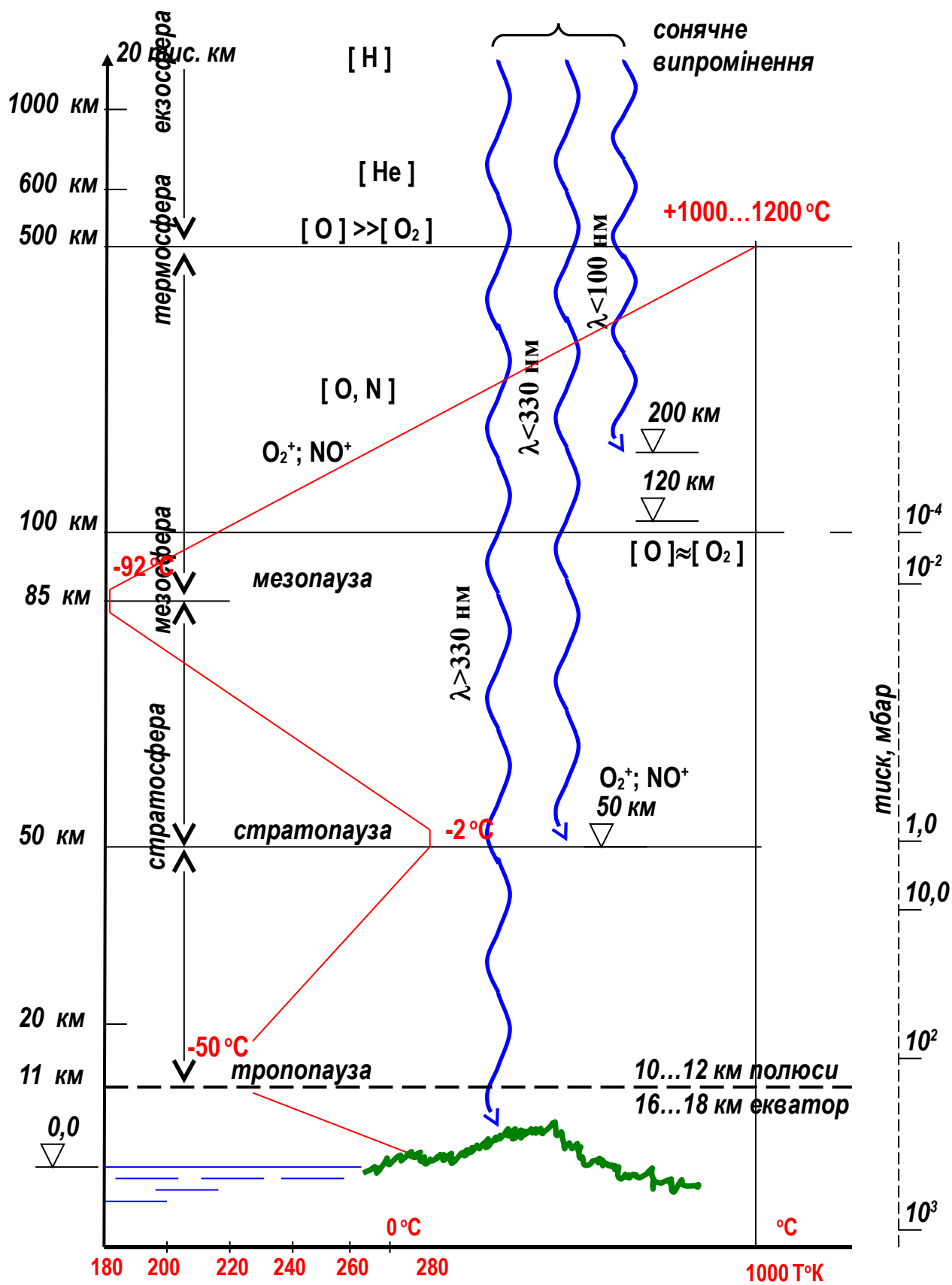


Рис. 1. Будова атмосфери

Життя на суходолах і у водних екосистемах головним чином визначається кліматом, хімічними факторами, ґрунтами, характеристикою рельєфу. Клімат являє собою усереднені характеристики погоди на певній території як загальну систему атмосферних або погодних умов, сезонних коливань і екстремальних погодних явищ за період не менше 30 років.

Дві важливі характеристики – температура із сезонними варіаціями і кількість та розподілення опадів за роками – визначають на поверхні землі окремі території з подібними умовами з особливим рослинним покривом і тваринним світом – біоми.

1.3. Рухливість атмосфери

Серед кліматичних характеристик визначну роль відіграє рухливість атмосфери. В свою чергу рухливість – інтегрований результат глобальних атмосферних течій і локальних рухів, викликаних градієнтами атмосферного тиску на окремих територіях.

Глобальні течії викликані законами механіки обертання Землі навколо своєї осі і складаються з вертикальних і горизонтальних течій [2]. Вертикальні течії локалізовані в трьох тороподібних витках у північній і південній півкулях. Всього глобально існує шість таких обертань. Зони піднімання повітря в цих обертаннях супроводжуються охолодженням повітря і випадінням опадів, зони опускання холодного і сухого повітря характеризуються дефіцитом вологості і пов'язані з поясами пустель. Третій північний і третій південний оберти створюють постійні атмосферні фронти в зонах північного і південного полярних кол. Зона підйому повітря в зоні екватора характеризується постійними тропічними дощами. Ці течії взаємодіють з основними напрямками руху атмосфери біля поверхні. В зоні полярних кіл – це східні поверхневі вітри. В зоні північного і південного тропіків – це знов східні вітри. В зонах між шестидесятою і тридцятиградусною широтами у північній і південній півкулях – це переважно західні вітри. Там, де повітря піднімається або опускається, а біля поверхні взаємодіють між собою протилежні горизонтальні потоки, виникають зони циклонічної або антициклонічної діяльності.

Повітря, що обертається в циклонах, характеризується підніманням теплого і вологого повітря в центрі, в антициклонах сухе і холодне повітря опускається до поверхні.

Всі процеси разом створюють градієнти аеростатичного тиску і локальні горизонтальні перетікання повітря вздовж поверхні.

1.4. Енергетичний баланс Землі та атмосфери

Клімат Землі контролюється кількістю сонячної радіації, яка перехоплюється Землею, і кількістю енергії, яка поглинається системою «атмосфера – земна поверхня» [1]. Усереднена температура Землі оцінюється моделлю, в якій представлені отримана і відбита енергії:

$$F_3 = F_S + F_P,$$

де F_3 – перехоплена енергія Сонця; F_P – відбита енергія; F_S – поглинута або отримана поверхнею енергія.

Питомий потік енергії Сонця на відстані орбіти Землі складає:

$E_C = 1370 \text{ Вт/м}^2$ і називається сонячною постійною. Доля сонячної постійної, яка відноситься до поверхні земної кулі, складає:

$$F_3 = \frac{E_C \cdot \pi R^2}{4\pi R^2} = \frac{1370}{4} = 343 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Площа πR^2 , де R – радіус Землі, – це переріз перехоплення енергії. Площа поверхні земної кулі, на якій перерозподіляється перехоплена енергія, – $4\pi R^2$. Частина перехопленої енергії, яка віддзеркалюється в космічний простір, пропорційна альбедо Землі R_P , яка дорівнює 0,3. Тоді

$$F_S = \frac{E_C}{4} \cdot (1 - R_P) = \frac{1370}{4} (1 - 0,3) = 240 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

а

$$F_P = E_C \cdot R_P = 1370 \cdot 0,3 = 411 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Тепловий баланс у системі «атмосфера – поверхня Землі» представлено на рис. 2.

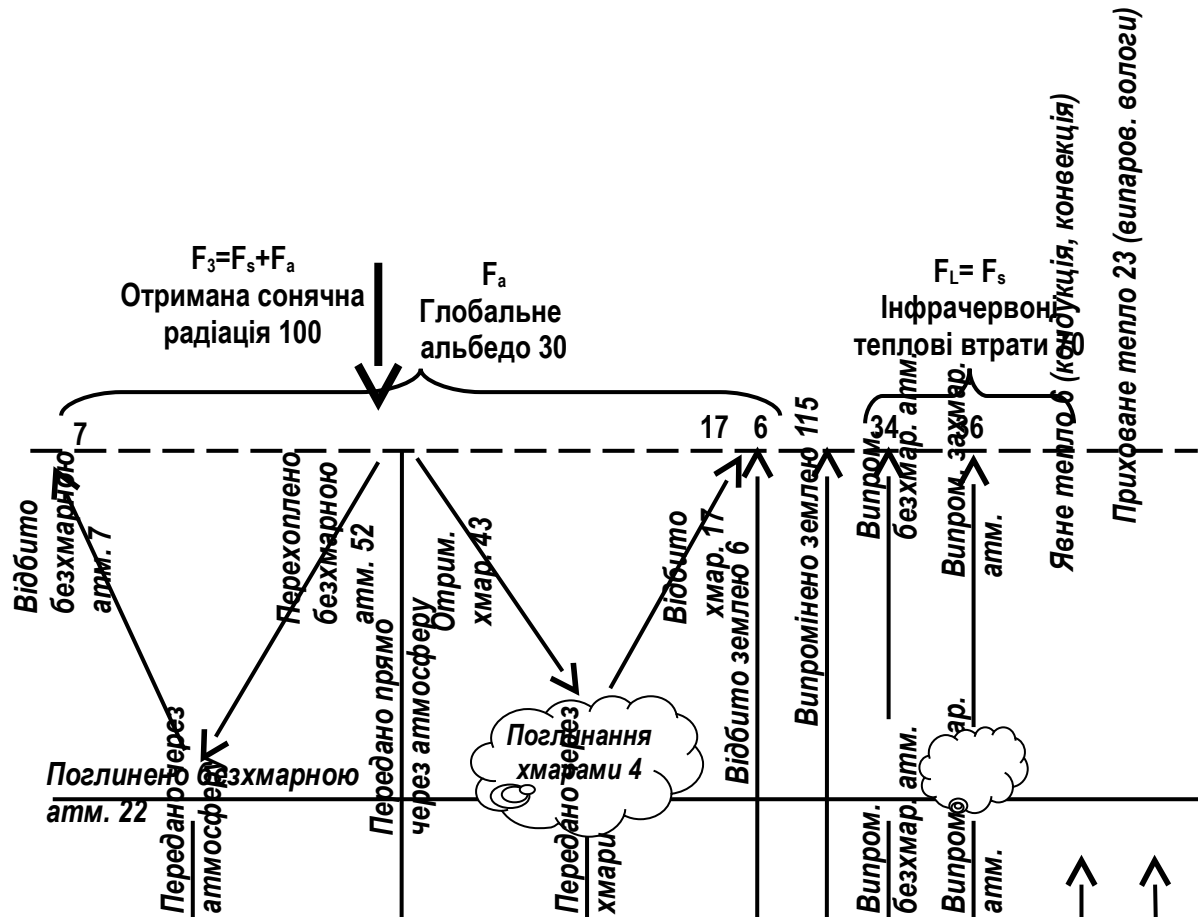


Рис. 2. Енергетичний баланс «Земля – атмосфера»

Зважаючи на кількість відзеркаленої енергії і енергії, яка випромінюється на рівні верхньої межі атмосфери в інфрачервоному діапазоні – F_L , можна знайти температуру випромінювання – T_L .

Якщо $F_s = F_L$, і $F_L = \sigma T_L^4$,

$$\text{де } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$$

– константа Стефана-Больцмана,

відповідно

$$F_L = 240 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \text{ тоді}$$

$$T_L = 255 \text{ К.}$$

На схемі представлені усереднені в глобальному масштабі основні теплові потоки в атмосфері. Атмосфера обмежена підстилковою поверхнею Землі і верхньою межею.

Тепловий баланс витримується як по поверхні Землі, так і по верхній межі атмосфери. Сама атмосфера, як напівпрозоре тіло, відбиває, поглинає

і пропускає теплове випромінювання Сонця, крім того, вона виступає як власне випромінююче тіло і як вміщувач прихованої теплоти (водяна пара).

Перехоплене Землею сонячне випромінювання розподіляється між безхмарною атмосферою і хмарами у співвідношенні 52 % і 43 % зі 100 % при тому, що 5% передаються через атмосферу прямо на поверхню.

З отриманих хмарами 43 % відбивається дзеркально 17 % і безхмарне небо відбиває 7 %. Безхмарна атмосфера поглинає 22% і пропускає до землі 23 %. Хмари поглинають 4 % і передають до поверхні 22 %. Земна поверхня дзеркально відбиває 6 %. Таким чином, складається сума відбитої глобально сонячної радіації:

$$17\% + 7\% + 6\% = 30\% \text{ (альбедо).}$$

Нагріта атмосфера стає джерелом інфрачервоного випромінювання як у бік верхньої межі атмосфери, так і в бік земної поверхні: 33% від безхмарної атмосфери в бік поверхні і 34% в бік верхньої межі, від хмар в бік землі 67% і 36% в бік Космосу. В сумі:

$$34\% + 36\% = 70\%,$$

разом з 30 % альбедо створює баланс 100% на верхній межі атмосфери. На рівні земної поверхні сумарна кількість отриманої теплоти:

$$23\% + 5\% + 22\% + 33\% + 67\% = 150\%.$$

Витрати складаються: відбиття – 6 %, теплопередача атмосфери явна і прихована – 29 %, випромінювання теплої поверхні в інфрачервоному діапазоні – 115 %. Тобто на рівні земної поверхні теж зберігається баланс: 150 % отриманої енергії і 150% втраченої.

Випромінювання з поверхні в кількості:

$$343 \cdot \frac{115}{100} = 394 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Відповідно температура чорного тіла T:

$$5,67 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 = 394 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \text{ або } T = 288 \text{ К.}$$

Різниця $288 - 255 = 33$ К між температурою випромінюючого чорного тіла на верхній межі атмосфери (система Земля – атмосфера) і температурою випромінюючого чорного тіла Земної поверхні називається парниковим ефектом [1].

1.5. Хмари в атмосфері, їх взаємодія з газами і аерозолями

У системі колообігів речовини екологічного значення важливе місце посідає кругообіг води.

У атмосфері відбуваються процеси повернення води, яка випарилася, на поверхню океанів і суходолів. Водяні пари, які знаходяться в нижніх шарах атмосфери, внаслідок гідродинамічних і термодинамічних факторів потрапляють у фазу конденсації. Для конденсації необхідний стан насичення і наявність ядер конденсації.

Хмарині ядра конденсації, звичайно, це розчинні гігроскопічні солі. В процесі конденсації хмара стає видимою, коли краплі води досягають розмірів 20...60 мкм. У подальшому тепловий фактор сили тяжіння, молекулярна і турбулентна дифузія сприяють або укрупненню крапель до міліметрових розмірів, або їх зменшенню, і таким чином створюють ситуацію випадіння опадів або їх відсутності [3].

Гази і аерозолі як природного, так і антропогенного походження включаються в механізми утворення хмар та їх подальшу еволюцію.

Хмари набувають кислотності, під час опадів промивають підхмарний простір. Хмари піднімаються у верхні шари тропосфери, утворюють перисті хмари і стають джерелом кристалів льоду. Забруднені кислі краплі у верхніх шарах являють собою суміш переохолоджених крапель і льодинок, які так чи інакше випаровуються і залишають великі частки, які включаються в глобальні перенесення і сприяють збільшенню фонові концентрації газів і аерозолів в атмосфері [4].

Запитання для самоконтролю

1. Як змінювався хімічний склад атмосфери в ході еволюції?
2. Які гази представлені в найбільшій кількості в сучасній атмосфері?
3. Назвіть гази, які відіграють ключову роль у підтримці життя на планеті і їх присутність в атмосфері являється ланкою біохімічного колообігу речовин.
4. Проаналізуйте рухливість атмосфери, її вплив на клімат і погодні умови.
5. Дайте характеристику речовинам у різних шарах атмосфери.
6. Як енергія Сонця перехоплюється Землею та яке її усереднене розподілення по поверхні?
7. Наведіть баланс енергії на верхній межі атмосфери.
8. Наведіть баланс на рівні поверхні Землі.
9. Розкрийте поняття парникового ефекту та його визначення на основі енергетичного балансу.
10. Назвіть роль хмар в перенесенні забруднень і в процесах самоочищення.

Лекції 4-8

Тема 2. Забруднювачі атмосфери, їх перетворення і розповсюдження

2.1. Джерела забруднення атмосфери

Існують дві групи джерел забруднення атмосфери: *природні*, які включають космічні та наземні джерела, і *штучні* – антропогенного походження [5].

Космос постачає космічний пил та метеорити (2...5 млн т/рік), які частково або повністю згорають в атмосфері.

Наземні джерела – вулканічна діяльність, лісові і степові пожежі, процеси вивітрювання, випаровування морів і океанів, продукти гниття і розпаду органічних речовин.

Штучні джерела пов'язані з виробництвом і використанням енергоносіїв, промисловими процесами, переробкою і знищенням відходів.

До основних антропогенних джерел забруднення відносять підприємства паливно-енергетичного комплексу, транспорт, різні машинобудівельні підприємства, найважливіші з них:

Теплові електростанції. Забруднюють атмосферу викидами, що містять сірчистий ангідрид, двоокис сірки, окисли азоту, сажа, яка є носієм смолистих речовин, пил і золу, що містять солі важких металів.

Комбінати чорної металургії, що включають доменне, сталеплавильне, прокатне виробництва; гірничорудні цехи, агломераційні фабрики, заводи коксохімічні та по переробці відходів основних виробництв, теплоенергетичні установи. Викиди в атмосферу містять оксид вуглецю, сірчистий ангідрид, пил, окисли азоту, сірководень, аміак, сірковуглець, аерозолі хрому і марганцю, бензол, фенол, піридин, нафталан.

Кольорова металургія – забруднює атмосферу сполуками фтору, кольорових і важких металів (часто у вигляді аерозолів), парами ртуті, сірчистим ангідридом, окислами азоту, окислом вуглецю, поліметалічним пилом, смолистими речовинами, вуглеводнями, що містять бенз(а)пірен.

Машинобудування і металообробка. Викиди в атмосферу підприємств цього профілю містять аерозолі кольорових та важких металів, зокрема парів ртуті, з парами органічних розчинників.

Нафтопереробка і нафтохімічна промисловість. Є джерелом таких забруднювачів атмосфери: сірководню, сірчистого ангідриду, оксиду вуглецю, аміаку, вуглеводнів, у тому числі бенз(а)пірену.

Підприємства неорганічної хімії. Викиди в атмосферу містять окисли сірки і азоту, сірководень, аміак, сполуки фосфору, вільний хлор, оксид вуглецю.

Підприємства органічної хімії. Викиди в атмосферу великої кількості речовин, що містять складний хімічний склад, соляної кислоти, сполук важких металів, сажі й пилу.

Підприємства по виробництву будівельних матеріалів. Забруднюють атмосферу пилом, що містять сполуки важких металів, фтору, двоокису кремнію, азбесту, гіпсу, тонко дисперсним скляним пилом.

2.2. Головні забруднювачі атмосфери [2; 4-6]

1. Оксиди вуглецю:

CO (чадний газ) – головні джерела: горіння біомаси, транспорт, фотохімічні процеси.

Глобальна емісія 660 млн т/рік, фонові концентрації до 50 ppbv, внаслідок забруднення 150...200 ppbv.

CO₂ – джерело вуглецю для процесу фотосинтезу в біосфері. Присутність його в атмосфері є ланкою кругообігу вуглецю в природі.

У ході фотосинтезу асимілюється – 113 Pg/рік (млрд т/рік), компенсація цієї витрати (Pg/р, млрд т/рік):

дихання – 55

мікробіологічне гниття і розклад – 42

ферментація в ході травлення травоядних – 5

гумус ґрунтів – 10

пожежі на суходолах - 1

Разом – 113 Pg/р.

Внесок країн з найбільшою промисловою емісією за 2023 рік становив 24,5 млрд т/рік. Це на 2,5 % більше, ніж у 2022 році. У трійці лідерів – Китай, США та Індія. [7].

2. Оксиди сірки та її сполуки: SO₂, SO₃, сульфат SO₄²⁻, карбонілсульфід COS, дисульфід вуглецю CS₂, диметилсульфід (CH₃)₂S, сірководень H₂S. Антропогенні джерела – 103 Tg/р (млн т/рік), в т.ч. 85% дає спалювання викопного палива. Очікується, що емісія Китаю

перевищить світову до 2030 р. В теперішній час природні джерела дорівнюють антропогенним.

3. *Оксиди та сполуки азоту:* N_2O , NO , NO_2 , NH_3 , амоній NH_4 , NO_3 .
Емісія в атмосферу:

NH_3 – 54 Tg/р (млн.т/рік), в т.ч. сечовина тварин (50%), пожежі біомаси, ґрунти;

NO_x – 48 Tg/р, в т.ч. антропогенна діяльність – 20 Tg/р, грозова діяльність 8 Tg/р, пожежі біомаси і ґрунти.

4. *Леткі органічні сполуки (VOCs):*

в їх числі – CH_4 , C_nH_{2n+2} (етан, пропан, бутан...), C_nH_{2n} (етілен...), C_nH_n – ароматичні (бензол), $C_{20}H_{12}$ – бензапірен (на частках кіптяви), $CHCl_3$ – хлороформ, $CHON$ – формальдегід, CH_2Cl_2 – метіленхлорид, хлорфторвуглеці – CFC_s – CCl_3F , CCl_2F_2 , $CClFCClF_2$, $CClF_2-CClF_2$ – фреони, чотирихлористий вуглець CCl_4 , бромати $CBrF_3$, фосген $COCl_2$, органічні аміни RNH_2 , де R – група C_xH_y , галогени Cl, Br, I.

5. *Аерозолі:* тверді частки диспергаційного походження, туман (краплі рідин), дими. Крім того, в переліку: частки ґрунту, кіптява (вуглець), азбест, свинець (Pb), кадмій (Cd), хром (Cr), миш'як (As), берилій (Be), солі амонію, нітратів сульфатів – NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , краплі кислот – H_2SO_4 , HNO_3 , мастил, розчинів пестицидів.

6. *Фотохімічні оксиданти:* озон O_3 , пероксиацетил-нітрат (ПАН), формальдегід, перекис водню (H_2O_2) – речовини, які утворюються під час сонячного освітлення за участю O_2 , NO_x , C_xH_y і парів H_2O .

7. *Радіоактивні речовини:* радон – (Rn^{222}), йод-131 (I^{131}), стронцій-90 (Sr^{90}), плутоній-239 (Pu^{239}).

8. *Теплота.*

9. *Шум.*

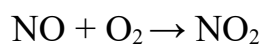
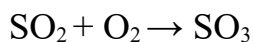
Первинні і вторинні забруднювачі [2]:

Розрізняють первинні і вторинні забруднювачі. Первинні – такі, що потрапляють в атмосферу безпосередньо з джерел, та вторинні – такі, що утворюються в ході атмосферних реакцій.

Серед первинних забруднювачів найбільш поширені чадний газ – CO, вуглекислий газ – CO_2 , діоксид сірки – SO_2 , оксид азоту – NO, леткі вуглеводні – C_xH_y , аерозолі, свинець – Pb.

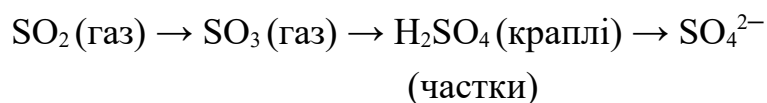
Основні атмосферні реакції [8]:

- Доокиснення:



- Конденсація – головним чином фазовий перехід (гази $\rightarrow$ пари $\rightarrow$ краплі)

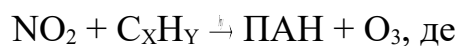
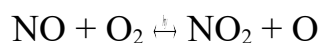
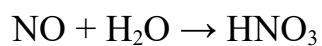
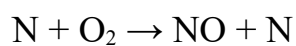
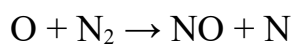
- Конверсія: газоподібні речовини $\rightarrow$ тверді частки, наприклад:



- Фотохімічні перетворення можуть бути під час грозової діяльності:

 } відомі як ланцюгова реакція фіксації азоту,

під впливом сонячного випромінювання:



ПАН – пероксиацетилнітрат – $\text{CH}_3\text{-CO-O-O-NO}_2$.

У цьому випадку суміш HNO_3 , ПАН, НСОН (формальдегід) і O_3 складає фотохімічний (окиснювальний, полуденний) смог.

2.3. Вплив забруднювачів повітря на навколишнє середовище [2; 8]

Вплив на рослини

Визначається втручанням в основні процеси життєдіяльності, в їх числі фотосинтез і водний режим. Механізм впливу полягає в блокуванні управління вустячками, руйнуванні мембран і хлоропластів.

Кислотні дощі пов'язані з розчиненням в атмосферних водах SO_2 , CO_2 , NO_2 і зниженням рН до 5,5...5,6 і навіть до 3,0. Найбільш чутливі трави, широколисті і хвойні рослини.

Механізми впливу пов'язані зі змінами в живленні кореневої системи (вилучування необхідних K і Ca і пошкодження розчиненими сполуками важких металів Pb , Hg , Cd ... і легкого Al). Рослини в більшій мірі освоюються комахами, мохами і лишайниками, життєздатними в кислих умовах, що спричиняє хвороби рослин. Підвищення кислотності водних об'єктів обмежує репродуктивність водних організмів, а при $\text{pH} \leq 4,0$ гине риба. В харчовій рибі накопичуються сполуки ртуті. Підвищується частота респіраторних захворювань і хвороби легенів у населення, які посідають третє місце після раку і серцево-судинних захворювань.

Вплив на матеріали характеризується втратою кольору, потускнінням, ерозією поверхонь. Найбільше потерпають архітектурні деталі оздоблення будинків, фарбові покриття, текстильні вироби, папір, шкіра, гончарні вироби.

Головні небезпечні речовини – SO_2 , NO_x , HF_1O_3 . Під впливом забруднення змінюються властивості атмосфери, такі як видимість, забарвлення (брудний бурий колір в присутності HNO_3) і випадіння опадів.

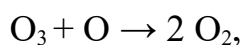
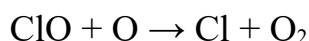
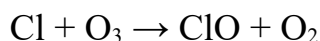
Глобальні впливи [5]

Атмосферні забруднення можуть виявляти себе не тільки на місцевому і регіональному рівні (видимість і опади), але й можуть набути глобального значення.

Сучасна проблема глобального потепління пов'язана із збільшенням емісії CO_2 та інших 3-атомних газів.

Наприкінці XIX ст. концентрація CO₂ в атмосфері була на рівні 290 ppmV, на кінець 70-х років XX ст. концентрація CO₂ складала близько 340 ppmV. Подвоєння вмісту CO₂ до 2050 року може викликати підвищення середньої температури планети на 2...3°C.

Витончення озонового шару (ОШ) обумовлює підсилення УФ-опромінення і, як наслідок, збільшення випадків онкологічних захворювань (зменшення концентрації озону [C_{o3}] на 1% дає приріст випадків раку шкіри на 5%) [2, 8]. Одна із моделей руйнування ОШ пов'язана з фотохімічним руйнуванням фреону:



де $h\nu$ – гамакванти сонячного випромінювання.

Аерозолі в атмосфері мають широкий спектр антропогенних джерел, відрізняються розмірами часток і можуть перебувати в атмосфері різний час – від 1...2 днів до 1...2 років – і розповсюджуватися до тропопаузи (рис. 3).

У глобальному плані аерозолі в атмосфері можуть приводити до зміни інтенсивності сонячного випромінювання за рахунок змін розсіювання, поглинання і альbedo і приводити до охолодження або до нагрівання земної поверхні.

Вплив забруднення повітря в помешканні на здоров'я людей

Зведення найбільш поширених речовин, їх джерел і наслідків впливу представлено в табл. 2.

Дрібні частки	Середні частки	Великі частки
---------------	----------------	---------------

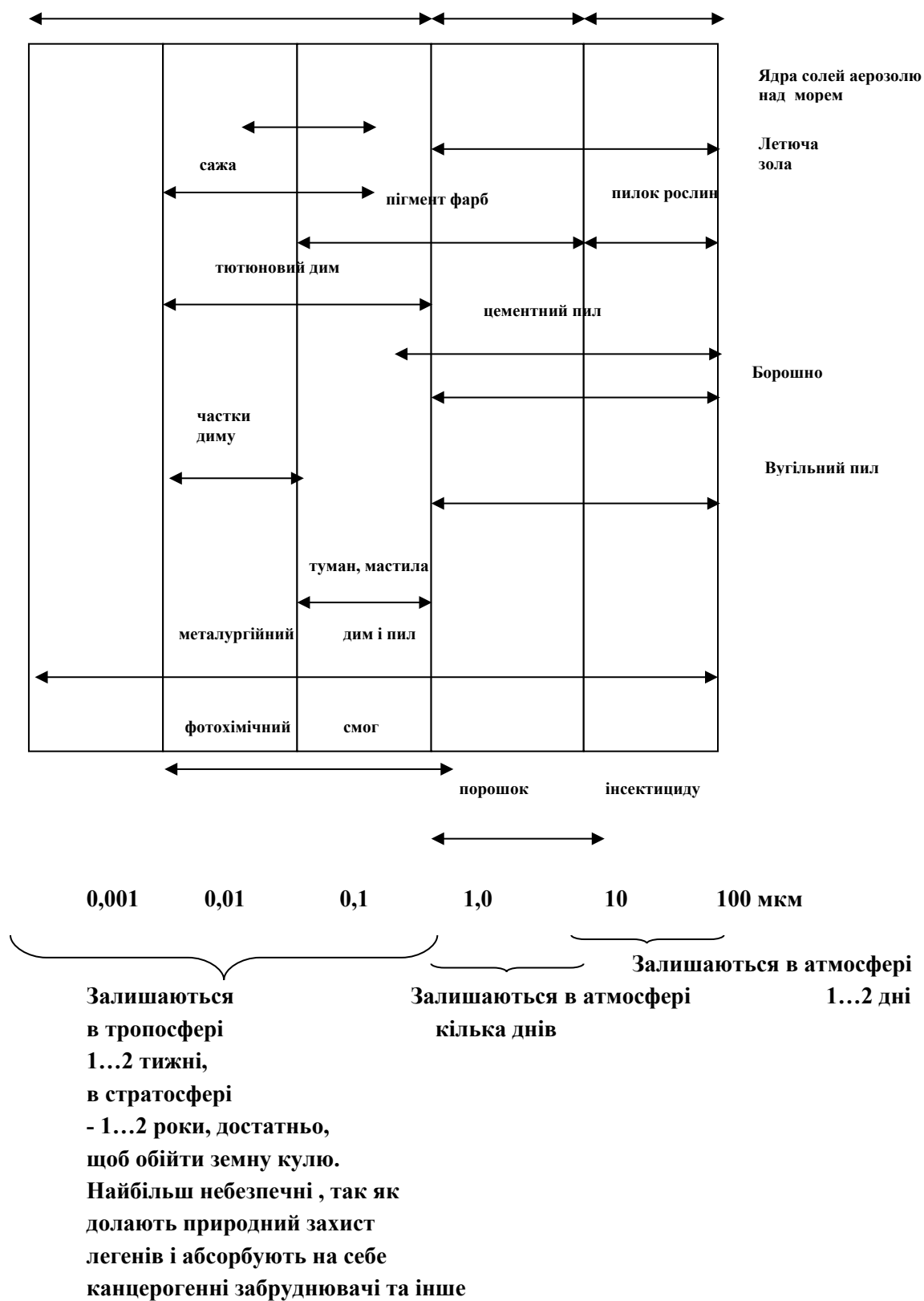


Рис. 3. Аерозолі

Таблиця 2

Вплив на людину

Речовина	Джерело	Вплив
Хлороформ CHCl_3	Хлорована вода в гарячому душі	Рак
Тріхлоретан $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}_3$	Аерозольні струмини інсектицидів, лаків, дезодорантів	Головокружіння, порушення дихання
Оксиди азоту NO_x	Невентильовані газові та гасові печі, печі на дровах	Подразнення легенів, дитячі простуди і нежиті, головні болі
Азбест	Вінілові труби, плитка, покриття	Хвороби легенів, рак легенів
Монооксид вуглецю (чадний газ) CO	Несправні котли, нагрівачі газові і гасові, печі – каміни на дровах	Головні болі, серцева аритмія, сонливість
Бенз-а-пірен $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$	Тютюновий дим, піч на дровах, що погано вентильовується	Рак легенів
Стірол	Пластмаси, синтетичні килими	Хвороби нирок і печінки
Формальдегід CHON	Синтетичні шкірозамінники на меблях, деревностружкові дошки, ізоляційні матеріали	Подразнення очей, горла, шкіри, легенів, нудота, головокружіння
Тетрахлоретилен C_2Cl_4 Метілен хлорид CH_2Cl_2	Залишки на одязі після хімчистки Пари розчинників фарб	Нервові розлади, небезпека для нирок і печінки, можливий рак, діабет
Радон – 222 Rn^{222}	Радіоактивність ґрунтів, що оточують фундамент, водопостачання із свердловин	Рак легенів
As, Mn, Ni, Cd, Hg, Pb	Спалювання вугілля, нафтопродуктів, виробництво скла, сталі	Рак шкіри, легенів, паркінсонізм

2.4. Розсіювання забруднювачів в атмосфері

Механізми розповсюдження забруднювачів

Описані процеси перенесення і перетворення забруднень за участю хмар в атмосфері впливають на регіональне і глобальне забруднення.

У той же час важливими для оцінювання локального забруднення є закономірності впливу атмосфери на струмину, яка відкидається із піднесених і наземних джерел. В цьому випадку процеси розбавлення і розсіювання відбуваються в прилеглому шарі потужністю до 1...3 км від земної поверхні, де розрізняють приземний прилеглий шар висотою 50... 100 м і перехідний шар до 1,0...3,0 км. [2]. Вище розташована вільна атмосфера з ізотропною турбулентністю. В межах приземного прилеглому шару і перехідного шару особливості рельєфу і шорсткість поверхні обумовлюють вертикальні градієнти горизонтальних швидкостей і підсилену турбулентність у вигляді флуктуацій вітру в горизонтальній і вертикальній площинах.

Струмини з власною температурою, що відрізняється від температури атмосферного оточення, набувають і власної плавучості. За нормальних метеоумов атмосфера характеризується від'ємним вертикальним температурним градієнтом:

$$\Gamma = -\frac{dt}{dH}, \text{ (зазвичай } \approx -1^\circ\text{C на 100 м висоти).}$$

Зміна концентрації в забрудненій струмині визначається середнім вітром (розбавлення на шляху струмини), турбулентністю (вимушена конвекція в напрямках, перпендикулярних середній швидкості) і характеристикою плавучості або сили витиснення (вільна конвекція) у вертикальному напрямку.

Деяку визначеність цим процесам надають число Рейнольдса (як критерій турбулентності):

$$Re = \frac{uH}{\nu},$$
$$\text{і число Річардсона: } Ri = \frac{g(\frac{dt}{dH} - \Gamma)}{T(\frac{du}{dH})^2},$$

як критерій співвідношення впливу вертикального градієнта температур і турбулентності (вільної і вимушеної конвекції), де

u – швидкість вітру, м/с,

H – відстань від поверхні, м

T – температура, К.

Критичне значення Ri дорівнює приблизно 1.

Стабілізація або припинення спливання при $R_i > 1$,

Нестабільні умови при $R_i < 1$.

Уяву про взаємодію факторів стабілізації і дестабілізації дає рис. 4.

На рисунку σ_ϕ і σ_θ – стандартне відхилення напрямків вітру у вертикальній і горизонтальній площинах, як зміна турбулентності по висоті.

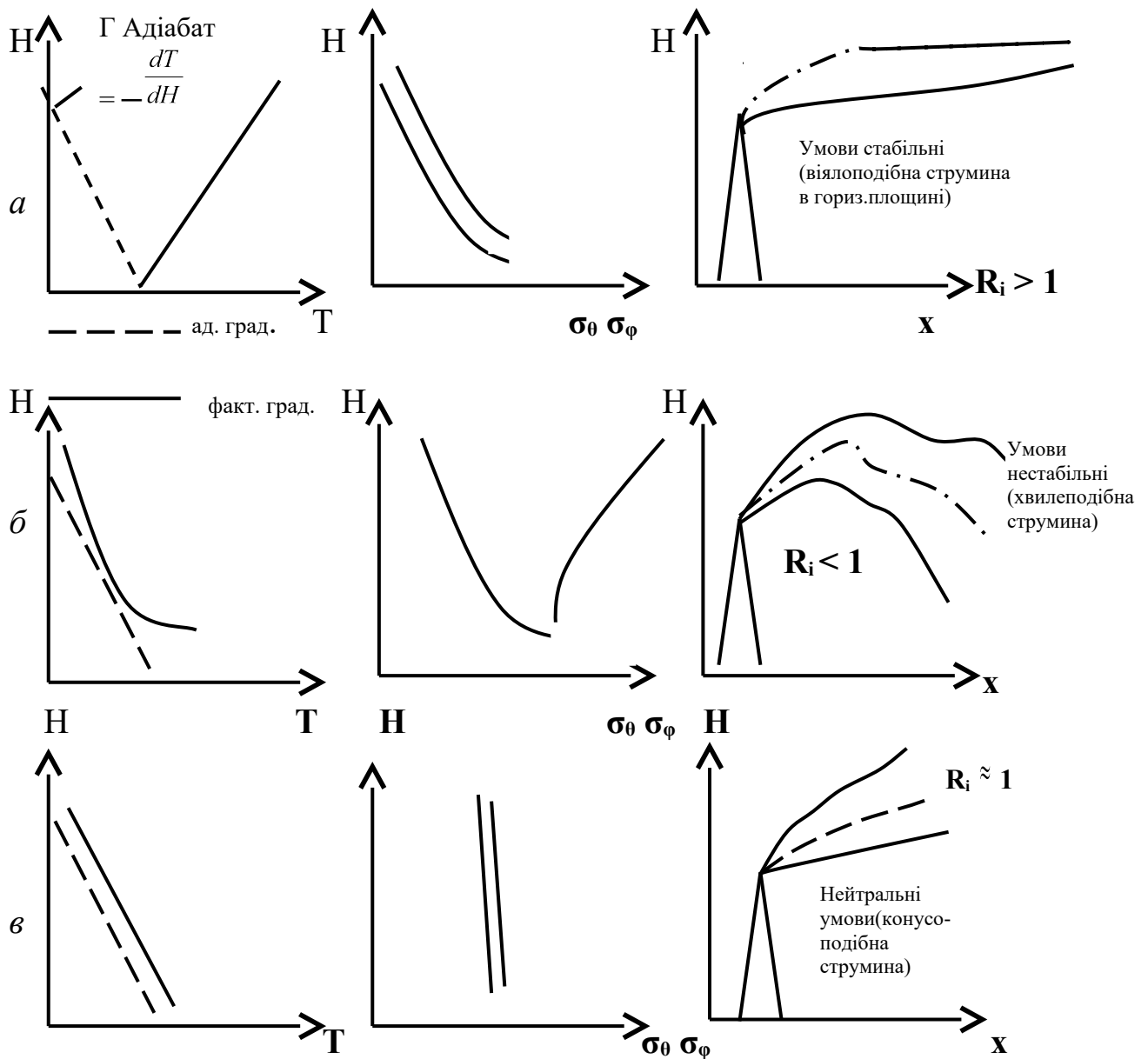


Рис. 4. Взаємодія факторів стабілізації і дестабілізації формування струмини

Схема а з графіками розподілення температури по висоті і характеристикою турбулентності по висоті ілюструє стабілізуючий фактор

збільшення температури по висоті (інверсія) в умовах зменшення турбулентності. Струмина, розбавлена навколишнім повітрям, набула температури, однакової з оточенням, що припинило її спливання, а помірна турбулентність обумовила віялоподібний вигляд в горизонтальній площині.

Схема б має графіки температур і турбулентності, які обумовлюють нестабільність розвитку струмини. Незважаючи на адіабатичний графік зміни температур, зростання масштабу турбулентності у вертикальній площині (σ_ϕ) надає хвилеподібний характер розвитку з швидким падінням на землю.

І, нарешті, схема в, в якій графік температур адіабатичний, а турбулентність по висоті не змінюється. В ході руху із швидкістю середнього вітру і помірного розбавлення температура в струмині тривалий час залишається меншою, ніж температура оточення, струмина зберігає імпульс спливання. Зовні струмина має конусоподібну форму.

Теорії розсіювання [9]

Якісно-кількісні пояснення ходу процесів розсіювання підготували схеми аналітичного оцінювання очікуваних концентрацій на шляху розповсюдження викиду.

Проблема турбулентної дифузії в атмосфері домішків у вигляді часток і газових молекул у теперішній час не знайшла єдиного аналітичного відображення.

Існують два концептуальних підходи. Згідно з першим, який називають **к-теорією**, або теорією градієнтного перенесення, диференціальне рівняння масоперенесення представляють у закріпленій системі координат у вигляді балансу маси домішку для виділеного диференційного об'єму. Ключовим є уявлення, що перенесення домішок пропорційно градієнту його концентрації. Механізми перенесення – середній вітер і турбулентна дифузія.

У спрощеному вигляді для одновимірної моделі рівняння має вигляд:

$$\frac{dc}{dt} = -u \frac{dc}{dx} + \frac{d}{dx} \left(k \frac{dc}{dx} \right),$$

де u – середня швидкість вітру в напрямку осі x ; k – коефіцієнт турбулентності або вихрової дифузії; c – концентрація домішки; x – відстань від джерела; t – час.

Статистична дифузійна теорія розглядає перенесення домішок як рух центру хмари шкідливої речовини. Розсіювання речовини всередині струмини підпорядковується закону нормального розподілення при тому, що струмина узагальнює сукупність дискретних кроків. Ключовими факторами є прийняття постійності характеристик турбулентності і використання характеристик стандартних відхилень σ_y , σ_z у функціях розподілення для перерізів у напрямках горизонтальної та вертикальної осей.

Основні складності використання обох теорій полягають у визначенні коефіцієнта **к-теорії** і дисперсійних коефіцієнтів статистичних (гаусових) моделей. Дослідження результатів рішення рівнянь турбулентної дифузії на екстремум з використанням даних експериментів підготували можливість створення інженерної методики.

2.5. Інженерний розрахунок концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі

Виконується згідно з методикою ОНД – 86, розробленою на основі **к-теорії** [9].

Ступінь небезпеки забруднення атмосферного повітря визначається найбільшим значенням приземної концентрації за несприятливих метеорологічних умов. Під несприятливими метеоумовами розуміють комбінацію небезпечної швидкості вітру і нестабільну стратифікацію, яка визначає умови вертикального і горизонтального розсіювання шкідливих речовин в атмосфері.

Максимальне значення концентрації в приземному шарі при викиді газоповітряної суміші з точкового джерела на відстані падіння факела на землю x_m визначається за формулою:

$$C_m = \frac{AMFm\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}},$$

де A – коефіцієнт, який залежить від температурної стратифікації атмосфери і відповідає несприятливим метеорологічним умовам. Для

України (джерела висотою до 200 м) має значення – 180 (географічні пункти в зоні північної широти 50...52°), південніше – 200; M – маса шкідливої речовини, яка викидається з джерела, г/с; F – коефіцієнт, який враховує швидкість осадження шкідливих речовин в атмосферному повітрі (газоподібні речовини – 1, дрібнодисперсні аерозолі – залежно від середнього коефіцієнту очищення від 2 до 3).

Коефіцієнти m та n визначаються залежно від параметрів f , v_m , v_m^I та f_e .

Параметри визначаються за формулами:

$$f = 1000 \frac{w_o^2 D}{H^2 \Delta T};$$

$$v_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V_I \Delta T}{H}};$$

$$v_m^I = 1,3 \frac{w_o D}{H};$$

$$f_e = 800(v_m^I)^3.$$

У свою чергу:

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,4\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}} \text{ при } f < 100,$$

$$m = \frac{1,47}{\sqrt[3]{f}} \text{ при } f \geq 100,$$

при $f_e < f < 100$ коефіцієнт m підраховують при $f = f_e$.

Коефіцієнт n при $f < 100$ підраховують залежно від v_m :

$$n = 1, \text{ при } v_m \geq 2,$$

$$n = 0,532v_m^2 - 2,13v_m + 3,13, \text{ при } 0,5 \leq v_m < 2,$$

$$n = 4,4v_m, \text{ при } v_m < 0,5.$$

Якщо $f \geq 100$ або $\Delta T \approx 0$, то коефіцієнт n визначають за наведеними вище формулами, при тому що $v_m = v_m^I$.

Для холодного викиду ($f \geq 100$, $\Delta T \approx 0$, $v_m^I \geq 0,5$) використовують формулу так:

$$C_m = \frac{AMFn\eta}{H^{4/3}} \kappa,$$

$$\text{де } \kappa = \frac{D}{8V_1} = \frac{1}{7,1\sqrt{w_o V_1}}.$$

Таким чином при $f < 100$ і $v_m < 0,5$ або $f \geq 100$ і $v_m^I < 0,5$ (дуже малі небезпечні швидкості вітру) максимальну концентрацію визначають так:

$$C_m = \frac{AMFm^I\eta}{H^{7/3}},$$

$$m^I = 2,86m, \text{ при } f < 100, v_m < 0,5$$

$$m^I = 0,9, \text{ при } f \geq 100, v_m^I < 0,5.$$

Відстань від джерел до місця, де концентрація набуває найбільшого значення:

$$X_m = \frac{5-F}{4} dH.$$

Для останньої формули d при $f < 100$ знаходять:

$$d = 2,48(1 + 0,28\sqrt[3]{f_e}), \text{ при } v_m \leq 0,5,$$

$$d = 4,95v_m(1 + 0,28\sqrt[3]{f}), \text{ при } 0,5 < v_m \leq 2,$$

$$d = 7\sqrt{v_i} (1 + 0,28\sqrt[3]{f}), \text{ при } v_m > 2.$$

Для холодного джерела при $f > 100$, або $\Delta T \approx 0$ d знаходять:

$$d = 5,7 \text{ при } v_m^I \leq 0,5;$$

$$d = 11,4v_m \text{ при } 0,5 < v_m^I \leq 2;$$

$$d = 16\sqrt{v_i^I}, \text{ при } v_m^I > 2.$$

Методика дає змогу знаходити значення небезпечної швидкості вітру u_m на рівні флюгера (10 м від рівня землі), за якої досягається найбільша приземна концентрація, а також значення приземної концентрації при швидкості вітру, яка відрізняється від небезпечної швидкості.

Методика дає рекомендації, як знайти концентрацію по осі факела на відстанях від джерела менших і більших x_m , а також по перпендикуляру від осі факела з визначенням коефіцієнтів S_1 по осі:

$$S_1 = f\left(\frac{x}{x_m}\right) \text{ і вбік } S_2 = f\left(\frac{y}{x}\right),$$

з використанням додаткового аргумента:

$$t_y = \frac{uy^2}{x^2}, \text{ при } u \leq 5, t_y = \frac{5y^2}{x^2}, \text{ при } u > 5.$$

В основній формулі c_m :

H – висота джерела над землею

(при $H \leq 2$ – наземні джерела,

$H = 2 \dots 10$ м – низькі джерела,

$H \geq 50$ м – високі джерела)

V_1 – витрата газоподібної суміші

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} w_0,$$

де D – діаметр устя джерела; w_0 – середня швидкість витоку суміші; η – коефіцієнт для врахування впливу рельєфу місцевості (у разі перепаду висот на 1 км менше 50 м, $\eta = 1$); ΔT – різниця температур викиду і навколишнього повітря.

Методика дає можливість враховувати вплив забудови і положення джерела відносно аеродинамічних тіней обтікання споруди.

Запитання для самоконтролю

1. Назвіть джерела забруднення атмосфери.
2. Чадний та вуглекислий гази, – який з них представлений в найбільшій кількості?
3. Назвіть основні сполуки азоту в атмосфері і його антропогенний внесок в забруднення атмосфери.
4. До якої групи забруднювачів відносяться вуглеводні?
5. Аерозолі як матеріальні частки: які їх групи ви знаєте?
6. Яке походження вторинних забруднювачів атмосфери?
7. В результаті яких реакцій утворюється фотохімічний смог?
8. Які реакції приводять до утворення кислот в атмосфері?
9. Які існують механізми пошкодження фотосинтезу і водного режиму рослин?
10. У чому полягають складові регіональних і глобальних впливів забруднень на атмосферу?
11. Які гази і речовини в повітрі помешкань мають канцерогенний вплив?
12. Які механізми руху і властивості атмосфери впливають на перенесення забруднень?
13. Які фактори перенесення мають стабілізуючий і дестабілізуючий вплив на перенесення струмини?
14. Чому інверсія і мала рухомість негативно впливають на розсіювання?
15. Назвіть головні ознаки к-теорії перенесення.
16. Яку кінцеву інформацію дає використання основної формули інженерного методу розрахунку розсіювання?
17. Які параметри впливають на збільшення основних показників розрахунку концентрацій шкідливих речовин?
18. Які параметри впливають на зменшення концентрації шкідливих речовин в приземному шарі?

Лекція 9

Тема 3. Нормування забруднення атмосфери

3.1. Моніторинг якості атмосферного повітря

Моніторинг атмосфери – це спостереження за станом повітря і попередження критичних ситуацій, що негативно впливають на здоров'я людей та стан інших живих організмів.

Моніторинг атмосфери здійснюється у відповідності із Законом України «Про охорону атмосферного повітря» [10, 11]. Моніторинг атмосфери передбачає спостереження за забруднюючими речовинами, шкідливими фізичними впливами та оцінку змін природного середовища в результаті біологічного забруднення.

Моніторинг атмосфери включає такі етапи:

- визначення мети та об'єктів спостереження;
- спостереження за джерелами забруднення;
- встановлення основних видів забруднення і забруднюючих речовин;
- вивчення впливу забруднення атмосфери на живі організми;
- прогноз змін середовища в результаті забруднення атмосферного повітря;
- розробка заходів і прийняття управлінських рішень, які направлені на збереження повітря.

Під час моніторингу атмосфери ведуться спостереження за такими речовинами: оксид вуглецю, двооксид вуглецю, оксиди азоту, оксиди сірки, аміак, озон, вуглеводні, завислі речовини. Визначається вологість і температура повітря, рівень шкідливих фізичних впливів.

Підписання Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом та його державами-членами, відкрило нові можливості щодо впровадження стандартів у сфері охорони довкілля. [12].

Для України впровадження законодавства ЄС в галузі охорони довкілля відбувається в межах восьми секторів і регламентується 29 джерелами права – Директивами та Регламентами ЄС, що встановлюють загальні правила та стандарти, які повинні бути відображені у внутрішньодержавному праві.

На відміну від сучасного природоохоронного законодавства України, джерела права ЄС визначають кількісні та якісні результати, які треба досягти

кожній країні протягом визначеного періоду часу та окреслюють процедури, які необхідно здійснити для досягнення цих результатів.

Особливістю Директив ЄС є те, що держави повинні адаптувати своє законодавство для досягнення цілей, визначених Директивами, але при цьому самі визначають методи їх досягнення.

Моніторинг за якістю атмосферного повітря регламентується шістьма директивами:

Директива 1999/32/ЕС про сірку у рідкому паливі.

Директива 98/70/ЕС щодо якості бензину та дизельного палива.

Директива 94/63/ЕС стосовно контролю летючих органічних сполук (ЛОС).

Директива 2004/42/ЕС про фарби.

Директива 2004/107/ЕС щодо As, Cd, Hg, Ni та поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ) у атмосферному повітрі.

Директива 2008/50/ЕС про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи.

3.2. Оцінка рівня забруднення атмосферного повітря

В Україні прийнято ряд законів і розроблені нормативні документи, які містять основні вимоги до охорони атмосферного повітря населених місць і місць масового відпочинку та оздоровлення населення. Введені в дію: Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів ДСП-173-96 [13], медико-санітарні нормативи охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними і біологічними речовинами)» [14], які розроблені у відповідності з «Основним законодавством про охорону здоров'я», Законом України «Про систему громадського здоров'я», Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища», Законом України «Про охорону атмосферного повітря». В статті 5 Закону України «Про охорону атмосферного повітря» наведено перелік необхідних нормативів в галузі охорони атмосферного повітря: нормативи екологічної безпеки атмосферного повітря (нормативи якості і гранично допустимі рівні впливу акустичного, електромагнітного, іонізованого та інших фізичних факторів), нормативи гранично допустимих викидів забруднювальних стаціонарних джерел, нормативи гранично допустимого впливу фізичних і

біологічних факторів стаціонарних джерел, нормативи вмісту забруднювальних речовин у відпрацьованих газах та фізичного впливу пересувних джерел, технологічні нормативи допустимого викиду забруднювальних речовин (на виході з технологічного обладнання)

Речовинні і енергетичні забруднювачі можуть діяти в різних напрямках як:

- токсичні речовини – такі, що смертельні в малих дозах для людей або смертельні для піддослідних тварин, більшість з них нервотоксини (нервовопаралітичні гази, токсин ботули, ціаністий калій, героїн, сполуки арсену, ртуті, свинцю, берилію, кадмію, пестициди);

- фізично небезпечні гази, пари, рідинно-паливні і вибухові; концентровані кислоти і луги (хімічне горіння);

- канцерогенні речовини і впливи: хімічні сполуки, віруси, випромінювання;

- мутагенні речовини і впливи;

- тератогенні речовини, впливи, віруси.

Для гігієнічної оцінки ступеня забруднення атмосферного повітря важливим є визначення гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин у повітрі населених пунктів (ГДК): середньодобових гранично допустимих концентрацій (ГДК_{с.д.}) і максимально разових гранично допустимих концентрацій (ГДК_{м.р.}), орієнтовано безпечних рівнів діяння (ОБРД), коефіцієнтів комбінованої дії (К_{к.д.}) сумісно присутніх речовин та встановлені на їх основі показники гранично допустимого забруднення (ГДЗ).

Гранично допустима концентрація (ГДК) шкідливої речовини в атмосферному повітрі населених місць – це максимальна концентрація, внаслідок дії якої протягом усього життя людини не виникає прямого або опосередкованого несприятливого впливу на теперішнє і майбутнє покоління, не знижується працездатність людини, не погіршується її самопочуття та санітарно-побутові умови життя. Визначення ГДК здійснюється органами охорони здоров'я з використанням узгоджених методик. Для токсичних речовин головний метод – досліди на тваринах за схемою «доза-ефект». Встановлюють летальні дози (ЛД) і (ЛД₅₀) і на підставі імовірісно-статистичної моделі визначають ГДК. Мутагенний вплив досліджують на бактеріях. Канцерогенний вплив досліджують на клітинах тканинних культур. Крім того, канцерогенний і тератогенний вплив вивчають епідеміологічними методами.

Орієнтовано безпечний рівень впливу (ОБРВ) – це максимальна концентрація забруднювальної речовини, яка визнається орієнтовно безпечною у разі впливу на людину та приймається як тимчасовий гігієнічний норматив допустимого вмісту речовини в атмосферному повітрі населених місць [14].

Коефіцієнт комбінованої дії ($K_{к.д.}$) відображає характер сумісної біологічної дії одночасно присутніх в атмосферному повітрі забруднювальних речовин (сумацій, посилення, послаблення або незалежна дія). Його цифрові значення встановлюється експериментальним (або розрахунковим) шляхом, виражається в долях від індивідуальних ГДК забруднювальних речовин і наведені в державних санітарних правилах [15], хоча цей документ вже недіючий, групи сумацій шкідливих речовин знаходяться згідно йому.

Показник гранично допустимого забруднення (ГДЗ) атмосферного повітря – відносний інтегральний критерій оцінки забруднення атмосферного повітря населених місць, який характеризує інтенсивність та характер сумісного діяння всієї сукупності присутніх у ньому домішок. ГДЗ розраховується для кожного випадку на основі визначених експериментально та затверджених у встановленому порядку коефіцієнтів комбінованої дії ($K_{к.д.}$):

$$\text{ГДЗ} = K_{к.д.} \cdot 100\%,$$

де $K_{к.д.}$ – знаходиться за додатком 1 [15].

У випадках, коли значення $K_{к.д.}$ відсутні, їх визначення проводиться за формулою:

$$K_{к.д.} = \sqrt{n},$$

де n – число речовин, присутніх у повітряному середовищі, для яких офіційно не встановлено характер комбінованої дії.

У випадках, коли присутні в атмосферному повітрі забруднювальні речовини являють собою складну суміш з встановленими та не встановленими коефіцієнтами комбінованої дії, для розрахунку ГДЗ значення $K_{к.д.с.с.}$ цієї суміші встановлюється за формулою:

$$K_{к.д.с.с.} = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (K_{к.д.1} + K_{к.д.2} + \dots + K_{к.д.n}) + n \right] + K_m},$$

де $K_{к.д.1,2,...,n}$ – коефіцієнти комбінованої дії для груп сумісно присутніх речовин; n – число речовин в суміші, значення $K_{к.д.}$ яких відсутні в офіційних списках; K_m – значення коефіцієнту для речовин з незалежним характером комбінованої дії.

Правила оцінки забруднення атмосферного повітря [16]

Порядок інформування населення про якість повітря за основними показниками з використанням індексу якості повітря (ІЗА – індекс забруднення атмосфери) в Україні (табл. 3) визначає механізм оперативного інформування населення про якість атмосферного повітря та його передбачуваний вплив на здоров'я та життєдіяльність населення з використанням індексу якості повітря, який відображає інформацію про комплексний вплив рівнів основних забруднюючих речовин на здоров'я населення в адаптованому для користувача форматі. Індекс будується на підставі вимірювання концентрації наступних показників: твердих часток ($ТЧ_{2,5}$); твердих часток ($ТЧ_{10}$); озону; діоксиду азоту; діоксиду сірки.

Таблиця 3

Показники індексу якості повітря в Україні на основі рівнів забруднюючих речовин

Забруднююча речовина	Показник індексу якості повітря в Україні (на основі рівнів забруднюючих речовин у мкг/куб. метрів)					
	Добрий	Допустимий	Задовільний	Незадовільний	Поганий	Дуже поганий
тверді частки ($ТЧ_{2,5}$)	0 – 10	11 – 20	21 – 25	26 – 50	51 – 75	76 – 800
тверді частки ($ТЧ_{10}$)	0 – 20	21 – 40	41 – 50	51 – 100	101 – 150	151 – 1200
озон	0 – 50	51 – 100	101 – 130	131 – 240	241 – 380	381 – 800
діоксид азоту	0 – 40	41 – 90	91 – 120	121 – 230	231 – 340	341 – 1000
діоксид сірки	0 – 100	101 – 200	201 – 350	351 – 500	501 – 750	751 – 1250

Розрахунок Індексу якості повітря проводиться на основі середніх значень концентрації забруднюючих речовин за окремий період, які отримані з моніторингу атмосферного повітря або моделювання атмосферної дисперсії; в якості рівня забруднюючих речовин у повітрі приймається концентрація та час фіксації цієї концентрації; Індекс якості повітря об'єднується в діапазони. Кожному діапазону присвоюється ідентифікатор, код кольору і рекомендації для населення щодо охорони власного здоров'я.

Індекс будується в порядку, за якого передбачається, що збільшення індексу буде показувати, що значна частина населення зіткнеться з серйозними наслідками для здоров'я.

Показник індексу якості повітря в Україні у формі зафарбованого у відповідний колір круга та текстовий показник індексу якості повітря в Україні, що наведені у табл. 3, а також текстове повідомлення для населення, та чутливого населення та вразливих груп про рекомендовані дії, пов'язані із показниками якості атмосферного повітря, відповідно до табл. 4.

Наведена у таблиці шкала для оцінки рівня та ступеня небезпечності забруднення атмосферного повітря приймається тимчасово і корегується у процесі накопичення нових даних.

У випадках, коли при оцінці забруднення атмосферного повітря сумішшю речовин виявляється перевищення значення граничних показників, мають визначатись провідні компоненти; провідними вважаються ті речовини в суміші, індивідуальні значення яких перевищують допустимі рівні (згідно з табл. 3).

**Текстові повідомлення для населення,
пов'язані з показниками індексу якості повітря в Україні**

Показник індексу якості повітря в Україні	Текстове повідомлення для всього населення	Текстове повідомлення для чутливого населення та вразливих груп населення
Добрий	Показник індексу якості повітря добрий. Насолоджуйтеся своїми звичайними видами діяльності на свіжому повітрі.	Показник індексу якості повітря добрий. Насолоджуйтеся своїми звичайними видами діяльності на свіжому повітрі.
Допустимий	Показник індексу якості повітря допустимий. Насолоджуйтеся своїми звичайними видами діяльності на свіжому повітрі.	Показник індексу якості повітря допустимий. Насолоджуйтеся своїми звичайними видами діяльності на свіжому повітрі.
Задовільний	Показник індексу якості повітря задовільний. Насолоджуйтеся своїми звичайними видами діяльності на свіжому повітрі.	Показник індексу якості повітря задовільний. Розгляньте можливість зменшення інтенсивної діяльності на свіжому повітрі, якщо ви відчуваєте погіршення симптомів захворювань.
Незадовільний	Показник індексу якості повітря незадовільний. Розгляньте можливість зменшити інтенсивну діяльність на свіжому повітрі, якщо ви відчуваєте такі симптоми, як біль в очах, кашель або біль у горлі.	Показник індексу якості повітря незадовільний. Розгляньте можливість зменшення фізичних навантажень, зокрема на свіжому повітрі, особливо якщо ви відчуваєте погіршення симптомів захворювань.
Поганий	Показник індексу якості повітря поганий. Розгляньте можливість зменшити інтенсивну діяльність на свіжому повітрі, якщо ви відчуваєте такі симптоми, як біль в очах, кашель або біль у горлі.	Показник індексу якості повітря поганий. Зменшіть фізичні навантаження, зокрема на свіжому повітрі, особливо якщо ви відчуваєте погіршення симптомів захворювань.
Дуже поганий	Показник індексу якості повітря дуже поганий. Зменшіть фізичні навантаження на свіжому повітрі.	Показник індексу якості повітря дуже поганий. Уникайте фізичних навантажень на свіжому повітрі.

Гігієнічні нормативи допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі [14, 15]

Значення коефіцієнтів комбінованої дії хімічних речовин ($K_{к.д.}$):

I. Перелік речовин (всього 51 комбінація), для яких за сумісної присутності в атмосферному повітрі встановлено ефект сумації біологічної дії з $K_{к.д.}$ рівним 1,0 (при розрахунку за формулою):

$$\frac{C_1}{ГДК_1} + \frac{C_2}{ГДК_2} + \dots + \frac{C_n}{ГДК_n} \leq 1,0.$$

II. Перелік речовин, для яких за сумісної присутності в атмосферному повітрі встановлено ефект неповної сумації біологічної дії:

а) $K_{к.д.} \leq 1,6$ – суміш 52: вольфрамат натрію, парамолібдат амонію, свинцю ацетат;

б) $K_{к.д.} \leq 2,0$ – суміш 53: вольфрамат натрію, миш'яковистий ангідрид, парамолібдат амонію, свинцю ацетат;

в) $K_{к.д.} \leq 2,5$ – суміш 54: вольфрамат натрію, германію діоксид, миш'яковистий ангідрид, парамолібдат амонію, свинцю ацетат.

III. Перелік речовин, для яких за сумісної присутності в атмосферному повітрі встановлено ефект посилення (потенціювання) біологічної дії:

$K_{к.д.} \leq 0,8$ – суміші 55 і 56: бутилакрилат, метилакрилат і фтористий водень, фтористі солі.

IV. Перелік речовин, для яких за сумісної присутності в атмосферному повітрі встановлено ефект незалежної біологічної дії (зберігається ГДК кожної речовини):

$$K_{к.д.} = П,$$

де П – кількість речовин, суміші 57 і 58: гексиловий, октиловий спирти і сірки діоксид, цинку оксид.

У додатку 1 [14] наведені значення гранично допустимих концентрацій (максимально разова і середньодобова) і клас небезпечності (всього 4 класи) для 517 шкідливих речовин.

Промислові підприємства, а також підприємства з технологічними процесами, які супроводжуються викидами шкідливих речовин в атмосферу, повинні мати санітарно-захисні зони, створені відповідно до вимог [13].

Ефективне, з екологічної точки зору, планування промислових підприємств базується на розробці системи заходів, пов'язаних із збереженням, поліпшенням та відновленням стану атмосферного повітря, запобіганням та зниженням рівня його забруднення та впливу на нього хімічних сполук, хімічних та біологічних факторів.

Запитання для самоконтролю

1. Назвіть основні етапи моніторингу атмосферного повітря.
2. Яку ви знаєте законодавчу базу щодо якості атмосферного повітря?
3. Яка існує система обмежувальних показників санітарно-гігієнічної оцінки атмосферного повітря?
4. Які можуть бути коефіцієнти комбінованої дії шкідливих речовин?
5. Що необхідно розрахувати для кількісної оцінки забруднення атмосферного повітря?

Лекція 10

Тема 4. Основи інженерного захиста атмосфери

4.1. Санітарно-захисні зони (СЗЗ)

Виконання положень ст.5 Закону України «Про охорону атмосферного повітря» здійснюється на основі реалізації вимог до планування і забудови населених пунктів [13], санітарних правил охорони атмосферного повітря населених місць [13-16], створення вузлів пилогазоочищення в системах вентиляції, реалізація галузевого нормативного документа з розрахунку розсіювання шкідливих речовин [9] у викидах підприємств.

Населені пункти повинні бути віддалені від промислових підприємств і об'єктів, які мають викиди шкідливих речовин в атмосферу на відстані санітарно-захисної зони.

Державні санітарні правила [13] представляють санітарну класифікацію підприємств та виробництв і відповідні класам розміри санітарно-захисних зон.

Всього визначено п'ять класів: I (А та Б), II, III, IV, V і відповідно до них 5 розмірів СЗЗ: I (А та Б) - 3000 м та 1000 м;

II - 500 м;

III - 300 м;

IV - 100 м;

V - 50 м.

Плануючи нові і для реконструкції діючих підприємств, необхідно забезпечити дотримання нормативів шкідливого впливу на атмосферне повітря, а під час планування розташування і розвитку міст та інших населених пунктів повинні враховуватися стан, прогноз змін і завдання охорони атмосферного повітря від шкідливих домішок.

Необхідно уникати будівництва підприємств з великими викидами шкідливих речовин в місцях застою повітря, в низинах і котловинах. Промислові об'єкти краще розташовувати на більш високих відмітках, за винятком місцевостей, в яких спостерігаються приземні інверсії.

Якщо промисловий об'єкт необхідно будувати в долині, то його не слід розташовувати на одній лінії з населеним пунктом (за напрямком панівного вітру). Тому в порівняно вузьких долинах промислові об'єкти потрібно розташовувати на більш високих відмітках або на схилах

долини. Житлова забудівля не повинна бути вище промислового майданчика підприємства, інакше переваги високих труб для розсіювання промислових викидів не є ефективними. Для порівняно спокійного рельєфу місцевості промислові підприємства розташовують на рівному підвищеному місці, яке добре продувається вітрами. По можливості їх необхідно розташовувати в спеціально відведеній для цього промисловій зоні, за межею населених пунктів і з підвітряної сторони від житлових масивів, щоб викиди виносилися в сторону від призначеної для забудови зони.

За наявності неблагополучних аерологічних умов (часті штилі, тумани) для розсіювання виробничих викидів в атмосфері за відсутності ефективних способів очищення викидів та ряду інших факторів санітарно-захисна зона може бути збільшена, але не більше як втричі (для відповідних техніко-економічних і гігієнічних обґрунтуваннях і наявності спільного рішення Міністерства охорони здоров'я і Держбуду України). У кожному конкретному випадку розміри санітарно-захисних зон і можливі відхилення від цих розмірів мають підтверджуватися розрахунками відповідно до вимог ОНД-86.

Одержаний за розрахунком розмір санітарно-захисної зони має уточнюватися як в сторону збільшення, так і в сторону зменшення залежно від рози вітрів району розташування підприємства.

Для розосереджених джерел викидів границя санітарно-захисної зони буде залежати від кількості і класу небезпеки викидів кожного джерела. Територія санітарно-захисної зони повинна бути упорядкована і озеленена. Із сторони житлової території передбачається ряд дерево-кущових насаджень шириною не менше ніж 60 м, а для ширини зони до 1000 м не менше ніж 20 м.

У санітарно-захисній зоні допускається розташовувати підприємства, їх окремі будівлі і споруди з виробництвами меншого класу шкідливості, ніж виробництво, для якого встановлена санітарно-захисна зона за умови аналогічного характеру шкідливості, пожежне депо, бані, пральні, гаражі, склади (за винятком громадських і спеціалізованих продовольчих), будівлі управлінь, конструкторських бюро, навчальних корпусів, магазинів, підприємств громадського харчування, поліклінік, науково-дослідних лабораторій, зв'язаних з обслуговуванням цього і прилеглі підприємств; приміщення для вартового аварійного персоналу і охорони підприємств, стоянки для громадського і індивідуального транспорту, місцеві і транзитні

комунікації, лінії електропередач, нафто- і газопроводи, артезіанські свердловини для технічного водопостачання, водоохолоджувальні споруди для підготовки технічної води; водопровідні і каналізаційні насосні станції, споруди зворотного водопостачання, підземні резервуари, розсадники рослин для озеленення підприємств і санітарно-захисної зони.

На території санітарно-захисної зони не допускається розташовувати підприємства, виробничі будівлі і споруди в тих випадках, коли виробничі шкідливі речовини, які виділяються одним із підприємств, можуть впливати на здоров'я працюючих або призводити до псування матеріалів, обладнання і готової продукції іншого підприємства, а також коли це може призвести до збільшення концентрацій шкідливих речовин в зоні житлової забудови вище допустимих. Розташування спортивних споруд, парків, дитячих закладів, шкіл, лікувально-профілактичних і оздоровчих закладів загального користування на території санітарно-захисної зони не допускається.

4.2. Потужність джерел викидів

Віднесення джерел до таких, для яких обов'язкове очищення і таких, які мають малу потужність, здійснюють за рекомендаціями розділу «Визначення концентрації шкідливих речовин в атмосфері вентиляційних джерел малої потужності» [17]. Викиди малої потужності зазвичай не очищують від джерел витяжної вентиляції з природним (тепловим або вітровим) побудженням.

В інших випадках передбачається очищення викидів з подальшим розсіюванням і контролем забруднення за межами СЗЗ.

Для розрахунків розсіювання по методиці ОНД [9] ключовими показниками джерела є його потужність M , г/с і висота, H , м. Потужність джерела визначається технологічним процесом і ефективністю вузла пило-, газоочищення.

У ряді випадків здійснення радикальних заходів щодо захисту повітряного басейну буває ускладненим, розрахованим на тривалий період і вимагає значних капітальних вкладень. У зв'язку з цим великого значення набуває розроблення і здійснення заходів з тимчасового скорочення шкідливих викидів в атмосферу в періоди несприятливих метеорологічних умов (НМУ).

Забруднення приземного шару повітря, утворюване викидами промислових підприємств, теплових електростанцій, транспорту та інших об'єктів переважно залежить від метеорологічних умов. В окремі періоди, коли метеорологічні умови сприяють накопиченню шкідливих речовин у приземному шарі атмосфери, концентрації домішок в повітрі можуть різко зростати. Щоб в ці періоди не допускати виникнення високого рівня забруднень, необхідне завчасне прогнозування таких умов і вчасне скорочення викидів шкідливих речовин в атмосферу. Розроблено методи прогнозування забруднення повітря. Оперативне прогнозування здійснюється в ряді міст країни. Прогнози високих рівнів забруднення повітря є підставою для регулювання викидів.

Під регулюванням викидів шкідливих речовин в атмосферу йдеться про їх короткочасне скорочення в періоди несприятливих метеорологічних умов, які призводять до формування високого рівня забруднення повітря. Регулювання викидів здійснюється з урахуванням прогнозу НМУ на основі попереджень про можливий шкідливий ріст концентрацій домішок у повітрі з метою його відвернення.

Прогноз забруднення атмосфери і регулювання викидів є важливою складовою частиною всього комплексу заходів щодо забезпечення чистоти повітряного басейну. Ці роботи дуже важливі в містах з відносно високим середнім рівнем забруднення повітря. Заходи зі скорочення викидів забруднюючих речовин в атмосферу в періоди НМУ розробляють підприємства, організації, заклади, розташовані в населених пунктах, де органами Держкомгідромету проводиться чи планується проведення прогнозування НМУ.

Під час розроблення заходів з регулювання викидів необхідно враховувати внесок різних джерел у створення приземних концентрацій домішок. У кожному конкретному випадку необхідно визначати, на яких джерелах належить скорочувати викиди в першу чергу, щоб одержати найбільший ефект. Так, з формули для розрахунку максимальної концентрації домішок у повітрі видно, що концентрація значно зменшується із збільшенням висоти труби, особливо у випадках гарячих викидів. Отже, в періоди НМУ за інших рівних умов необхідно в першу чергу скорочувати низькі викиди.

Концентрація домішок залежить від числа труб, через які надходять в атмосферу шкідливі речовини. Ця залежність особливо значна для випадку холодних викидів, для яких концентрація прямо пропорційна числу труб. У зв'язку з цим у разі настання НМУ

необхідно в першу чергу знижувати викиди, які надходять з великої кількості дрібних джерел. Значення концентрації зменшується із збільшенням перегрівання викидних газів відносно до навколишнього повітря. Чим холодніші викиди, тим більш ефективним для зменшення приземних концентрацій є їх короткочасне скорочення.

Для ефективного попередження підвищення рівня забруднення повітря в періоди НМУ необхідно в першу чергу скорочувати низькі, розосереджені, холодні викиди.

Під час розроблення заходів з короткочасного скорочення викидів в періоди НМУ необхідно щоб:

- заходи були достатньо ефективними і практично виконуваними;
- заходи враховували специфіку конкретних виробництв.

У зв'язку з цим їх необхідно розробляти головним чином безпосередньо на підприємствах і в галузевих інститутах;

- здійснення розроблених заходів, по можливості, не супроводжувалося скороченням виробництва. Таке скорочення в зв'язку з виконанням додаткових заходів допускається тільки в окремих випадках, коли загроза інтенсивного накопичення домішок у приземному шарі атмосфери особливо велика.

Попередження про підвищення рівня забруднення повітря в зв'язку з очікуваними несприятливими метеорологічними умовами складають у відповідних прогностичних підрозділах. Застосовують два види попереджень про можливе формування підвищеного рівня забруднення повітря: від окремих джерел і по місту в цілому. В першому випадку попередження пов'язані з ростом концентрацій домішок в повітрі, що створюються викидами одного чи групи джерел; в другому – з ростом загальноміського забруднення повітря.

Залежно від очікуваного рівня забруднення атмосфери складаються попередження трьох ступенів, яким відповідають три режими роботи підприємств в періоди НМУ.

Запитання для самоконтролю

1. Скільки існує класів небезпеки підприємств.
2. Які існують розміри санітарно-захисних зон.
3. За яким нормативним документом призначаються СЗЗ?
4. Які основні показники вибирають під час розрахунків розсіювання шкідливих речовин?

Лекція 11

Тема 5. Пилоочищення

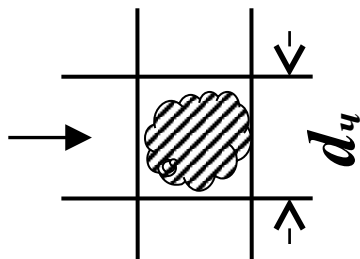
5.1. Дисперсний склад (ДС) пилів

Вибір технології та конструкції вузла очищення залежить від фізико-хімічних властивостей пилу. Серед них головні: густина, злипаємість, абразивність, електричні характеристики (питомий опір та зарядженість), змочуваність, пожежо- та вибухонебезпечність, дисперсний склад [6].

ДС – характеристика розмірів і кількостей часток з яких складається пил.

Розміри часток можуть бути геометричними і аеродинамічними (діаметри Стокса d_{st}).

Геометричні діаметри визначаються як фактичні: за розміром отвору сита через який проходить частка по периметру частки $\Pi = \pi d_q$, за площиною проєкції $F = \frac{\pi d_q^2}{4}$, за найбільшими розміром під час дослідження під мікроскопом (довжина волокна).



Діаметр Стокса – d_{st} при подібності ρ – ідею густини матеріалу, діаметр частки сферичної форми, яка має однакову швидкість вільного падіння, що і дана частка довільної форми.

Кількість часток певних діаметрів визначається на основі ситового аналізу на основі каскаду реальних сит, труби класифікатора, каскадного імпактора.

У ході аналізу отримують фракційне розподілення у вигляді таблиці, або в графічній інтерпретації у вигляді **гістограми** розподілення.

В якості ілюстрації послідовності обробки ситового аналізу пропонується умовний результат ситового аналізу.

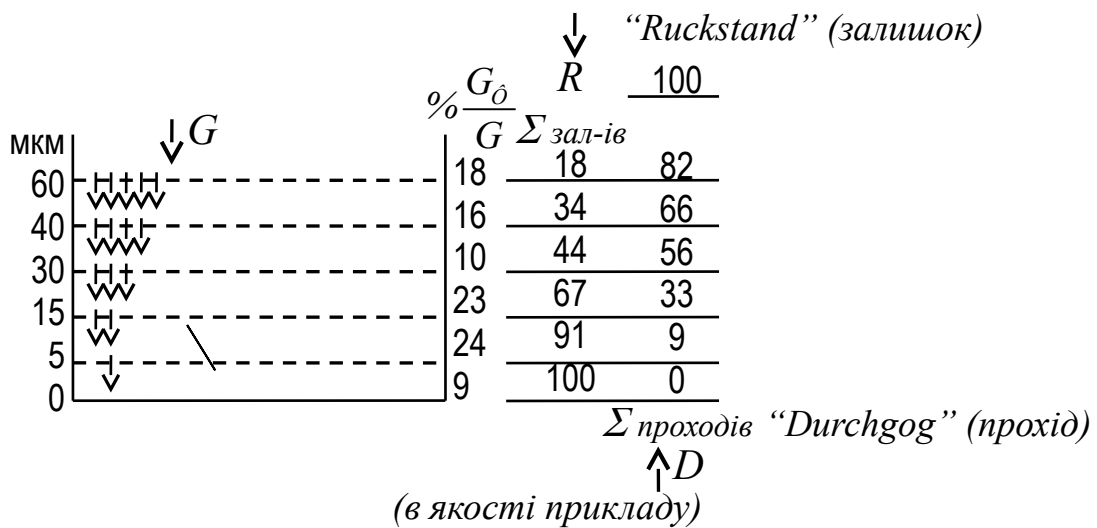


Рис. 5. Каскад умовних сит, таблиця ситового розподілення, послідовна сума «залишків» на ситах (R) і сума «повних проходів» (D)

Якщо наведений відсотковий склад фракцій по масі $\Phi(d)$, то у відсотках масове розподілення можна представити у вигляді гістограми рис. 6.

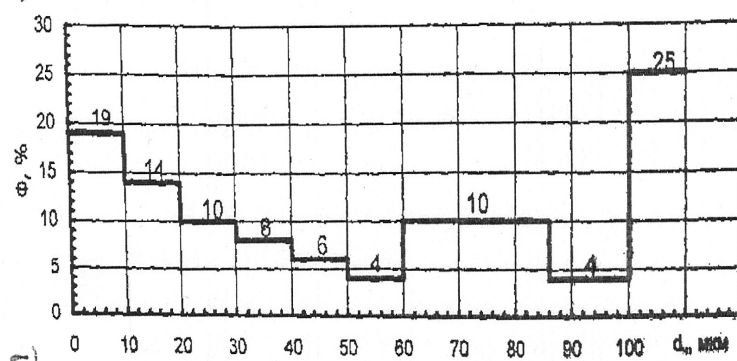


Рис. 6. Ступінчастий графік $\Phi(d)$ розподілу пилу по фракціях

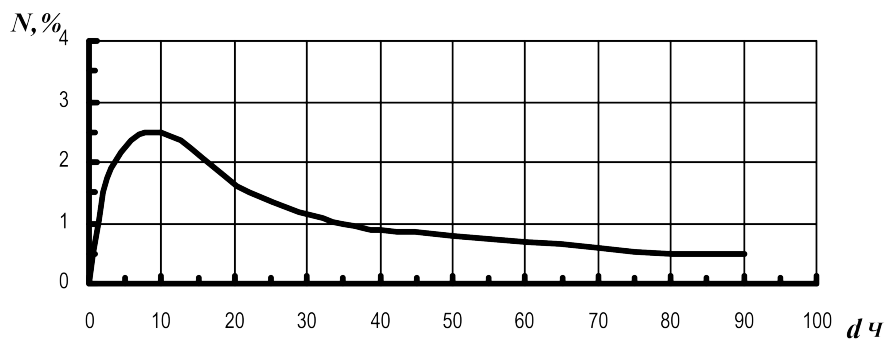


Рис 7. Диференційна крива розподілення в лінійних координатах

Характер залежності зазвичай відповідає логарифмічно-нормальному закону розподілення.

$R(d), D(d), \%$

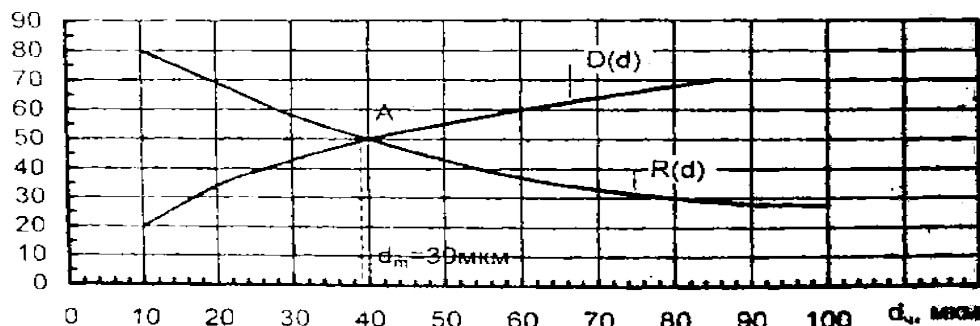


Рис. 8. Інтегральна крива розподілення

Інтегральна сума парціальних (фракційних) кількостей у лінійних координатах у вигляді $\sum^D$ послідовно від найменших до найбільших d_q називається інтегральною кривою розподілення, її симетрична сума «залишків» на ситах $\sum^R$ відносно точки з координатами $\sum^D = 50\%$ і $d_q = d_m$.

d_m — визначається, як медіанний діаметр, відносно якого масові кількості інтегральної суми однакові. Маса часток дрібніших за d_m дорівнює масі часток більших за d_m .

Розтягнутість кривої розподілення кількісно оцінюється за допомогою параметра σ — стандартного відхилення в функції розподілення маси часток по розмірам. Інтеграл імовірності :

$$D(d_q) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (1)$$

де $t = \lg \frac{d_q}{d_m} / \lg \sigma_x$.

Інтегральне розподілення в імовірностно-логарифмічній системі координат (рис. 9) набуває вигляду прямої лінії, яка проходить через дві точки з координатами:

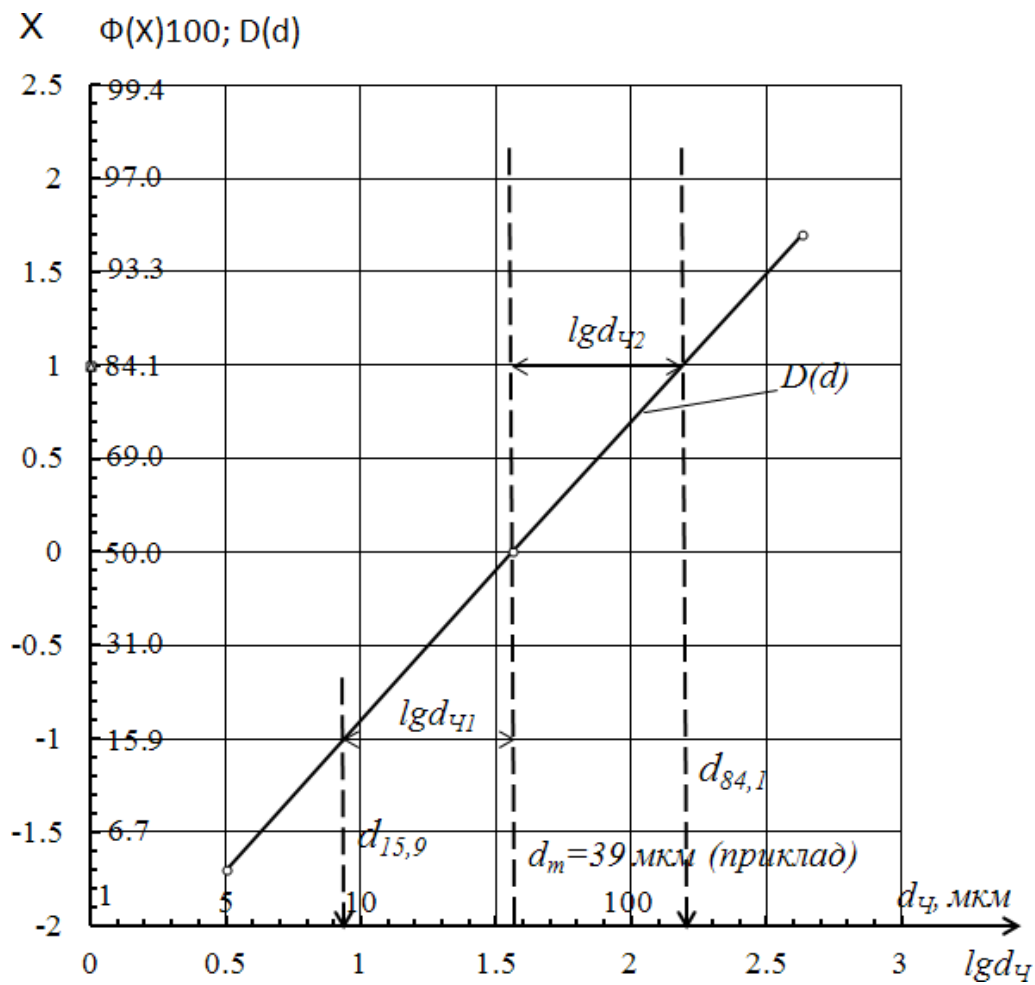


Рис. 9. Спрямлення інтегральної кривої розподілення в імовіротно-логарифмічній системі координат (ІЛСК)

Точка 1 – вертикальна вісь значення нормальної функції розподілення – 0,0 (інтегральна сума $D = 50\%$), горизонтальна вісь – $\lg d_m$, точка 2 – вертикальна вісь значення нормальної функції +1,0 (інтегральна сума $D = 84,1\%$) горизонтальна вісь – $\lg d_{84,1} = \lg d_m + \lg \sigma$, замість точки 2, може використовуватись точка 2¹ з координатами: -1,0 ($D = 15,9\%$) і $\lg d_{15,9} = \lg d_m - \lg \sigma$. Таким чином, кожний окремий дисперсний склад пилу визначається в полі імовіротно – логарифмічних координат своєю прямою лінією.

Пил різного походження з різним дисперсним складом класифікують за номограмою (рис. 10).

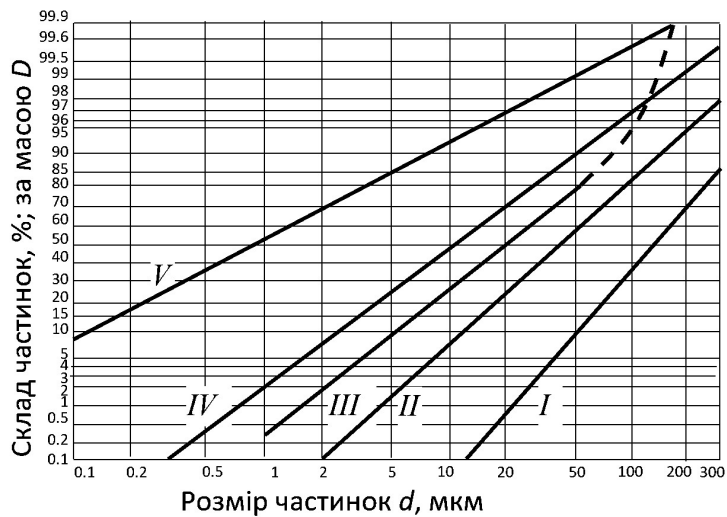


Рис.10. Класифікаційна номограма пилу

Стандартна класифікація утримує п'ять класів пилів:

- I – дуже великодисперсний пил;
- II – великодисперсний пил (наприклад, пісок для будівельних розчинів);
- III – середньодисперсний пил (наприклад, цемент);
- IV – дрібнодисперсний пил;
- V – дуже дрібнодисперсний пил.

Запитання для самоконтролю

1. Що таке дисперсний склад?
2. З яких основних показників складається характеристика пилу.?
3. З яких показників складається характеристика дисперсного складу?
4. Що таке геометричний і аеродинамічний діаметри часток пилу.
5. Скільки класів пилу існує за класифікаційною номограмою?

Лекції 12,13

Тема 6. Основи механіки аерозолів

Техніка пиловловлювання ґрунтується на використанні механізмів, які здатні вивести аерозольні частки з повітряних потоків. Відомі такі силові впливи на пилові частки:

- масові сили (тяжіння $P = mg$ та інерції $F = ma$);
- гідродинамічні (аеродинамічний опір);
- дифузійні (броунівський рух, термо-, фото-, дифузійофорез);
- поверхневі сили (адгезія, аутогезія);
- електричні сили.

6.1. Відносно рівномірний рух, взаємодія часток з газовим (повітряним) потоком

- Частки субмікронних розмірів (10^{-9} м) (рис. 11)

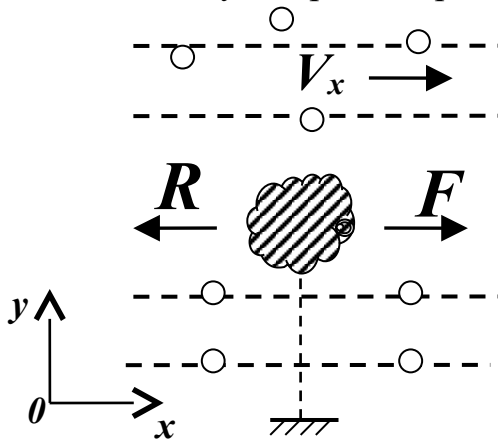


Рис. 11. Розрахункова схема (субмікронні частки)

Розрахункова схема утримує частку, яка має механічний зв'язок із стінкою. Зв'язок утримує частку від руху. Потік рухається в напрямку x із швидкістю v_x , м/с. Розмір частки малий настільки, що траєкторії газових молекул під час проходження їх повз частку залишаються прямолінійними. Вплив потоку на частку виникає внаслідок більшої кількості ударів молекул газу з навітряної сторони, ніж з завітреної.

Створюється сила тиску потоку F на частку. Оскільки частка закріплена, то сила F врівноважується силою реакції R , спрямованої проти течії.

У цих умовах молекулярна механіка дає :

$$F = \frac{3\pi\mu d^2 v_x}{\kappa_{OT} \ell} \quad i - R + F = 0, \text{ крім того,} \quad (2)$$

μ – динамічна в'язкість повітря, кг/мс,

κ_{OT} – коефіцієнт відбиття молекул газу,

ℓ – довжина вільного пробігу молекул, $\ell = \frac{\kappa T}{2\pi P d_{m_0}}$, P

– тиск газу,

T – абс. температура,

d_{m_0} – діаметр молекул.

– Частки мікронних розмірів (10^{-6} м) (рис. 12)

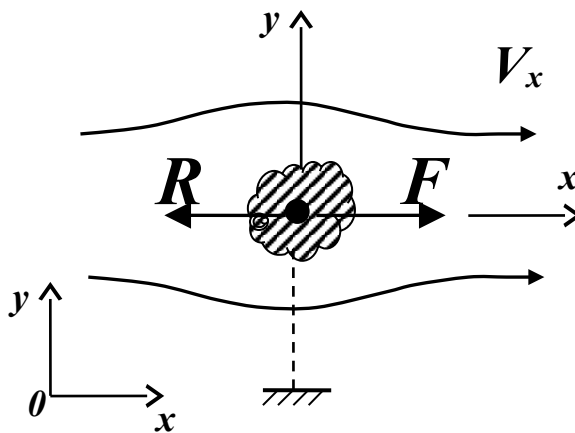


Рис. 12. Розрахункова схема (мікронні частки)

Схема подібна до попередньої, але лінії течії обтікають частку із змінною траєкторії. Як і в попередньому випадку:

$$- R + F = 0, \text{ а } F = C_s \frac{P v_x^2}{2} \frac{\pi d^2}{4}, \text{ де} \quad (3)$$

C_s – коефіцієнт Стокса, який залежить від числа Re.

$$\text{При } Re = 1,0 \quad C_s = \frac{24}{Re}, \quad (4)$$

$$\text{При } 3 < Re < 400 \quad C_s = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}. \quad (5)$$

З урахуванням, що

$$C_s = \frac{24\gamma}{v_x d} = \frac{24\mu}{v_x \rho d}, \text{ а } \gamma = \frac{\mu}{\rho} - \text{кінематична в'язкість;} \quad (6)$$

d – діаметр частки.

$$F = 3\mu\pi d v_x \quad (7)$$

У свою чергу роблять припущення, що

$$F = \mu\pi d v_x + 2\mu\pi d v_x \quad (8)$$

сила тиску сила тертя.

6.2. Нерівномірний рух

Нерівномірний рух характеризується початковою умовою, коли швидкість частки v , відрізняється від швидкості потоку w .

Загальне рівняння руху в векторній формі має вигляд:

$$m \frac{d\vec{v}}{d\tau} = 3\pi\mu d (\vec{w} - \vec{v}) \pm \vec{F}, \text{ де } \vec{F} - \text{вектор деякої іншої сили.} \quad (9)$$

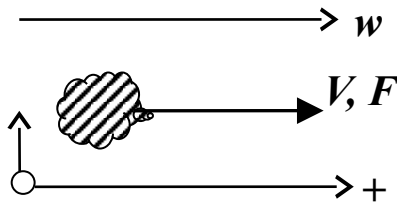
У проєкціях на x та y в прямокутній системі координат:

$$m \frac{dv_x}{dt} = 3\pi\mu d (w_x - v_x) \pm F_x, \quad (10)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = 3\pi\mu d (w_y - v_y) \pm F_y. \quad (11)$$

Можна розглянути два випадки:

1) Рух у горизонтальному потоці з швидкістю w в напрямку координатної осі при тому, що частка має початкову швидкість в тому ж напрямку v , сила тяжіння проєктується в «0».



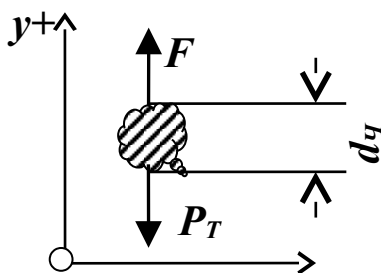
Тоді, $m \frac{dv}{dt} = 3\pi\mu d (w - v)$, при $m = \frac{\pi d^3}{6} \rho_i$, прискорення частки:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{18\mu}{d^2 \rho_i} (w - v) = \frac{w - v}{\tau}, \text{ а } \tau = \frac{d^2 \rho_i}{18\mu} - \text{час релаксації частки, або час}$$

основної зміни швидкості. Після інтегрування визначається швидкість частки через час t : $v = w(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$. (12)

При $t \gg \tau$ $v = w$, з часом, який більше τ частка набуває швидкості потоку.

2) Подібним чином розглядається вертикальне осадження частки під дією сили тяжіння P_T в нерухомому газовому середовищі



$$W = 0, -m \frac{dv}{dt} = +3\pi\mu d v - mg, \text{ де} \quad (13)$$

$$P_T = mg - \text{сила тяжіння} \quad (14)$$

Рішення рівняння руху і його інтегрування:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{v}{\tau} + g \quad (15)$$

$$\ln(v - \tau g) = -\frac{t}{\tau} + \ln(-\tau g) \quad (16)$$

З часом частка набуває швидкості

$$v = \tau g(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \text{ при } t \gg \tau \quad v = \tau g. \quad (17)$$

В умовах не поступової зміни швидкості, а в стані врівноваженості сили тяжіння і сили гідродинамічного опору отримуємо подібний результат: $F - P_T = 0$, $3\pi\mu d v = \frac{\pi d^3}{6}(\rho_i - \rho)g$, $v = \frac{d^2 \rho_i}{18\mu} g$ – швидкість вільного падіння.

6.3. Інерція прямолінійного руху

Створює механізм інерційної сепарації, або імпакції (рис. 13)

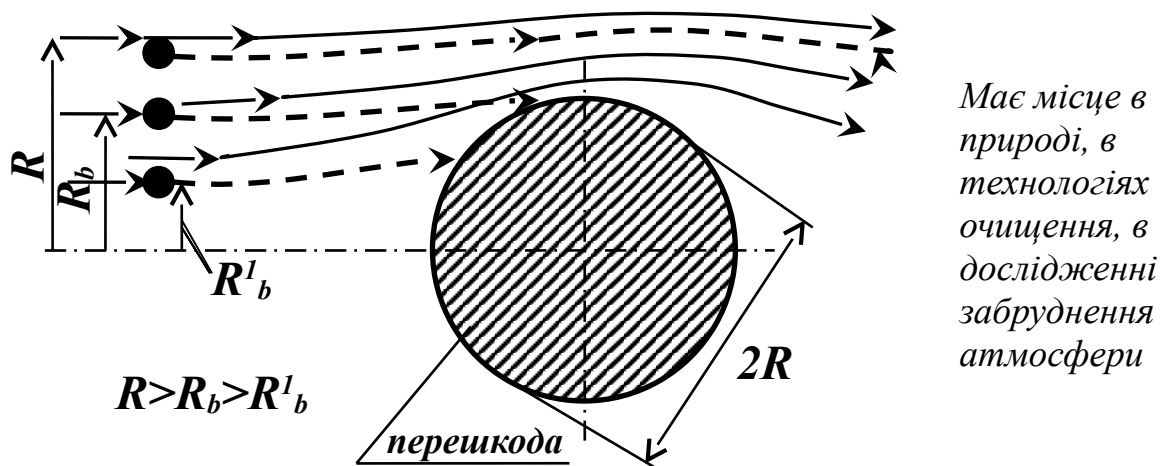


Рис. 13. Схема імпакції

Перешкода діаметром $2R$ розташована на шляху потоку, який переносить аерозольні частки. Розглядаються три частки на відстанях R^I_b , R_b та R від осі системи. Частки відстані R^I_b не встигають відхилитися від перешкоди разом з повітрям і влучають в неї, частки на відстані R_b починають відхилятися, але торкаються по дотичній траєкторії, частки на відстані R обминають перешкоду.

Якщо вважати влучення, або торкання до перешкоди ефектом вловлювання (затримання), тоді ефективність перешкоди при формі циліндра $\eta = \frac{R_b}{R}$, при формі кулі $\eta = \frac{R_b^2}{R^2}$; показник η залежить від Re :

$$\eta = f(Re),$$

Під час експериментальних досліджень і теоретичних узагальнень встановлено, що η є функцією K_p де $K_p = St = \frac{\tau}{\nu_o}$, тобто інерційний параметр (число Стокса) є відношення часу релаксації до часу обминання перешкоди.

6.4. Дифузійні процеси

Дифузійне осадження працює додатково в разі обминання перешкоди на основі броунівського руху і ефективно для субмікронних часток.

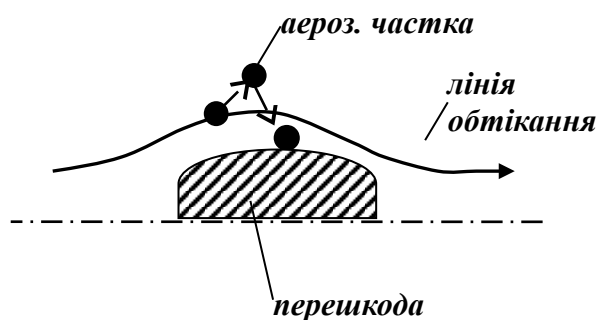


Рис.14. Дифузійне зрушення з лінії обтікання

Аналітично процес може визначитись швидкістю приєднання часток до поверхні перешкоди $-\frac{\partial n}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$, або швидкість зникнення часток з потоку пропорційна концентрації, де x відстань до поверхні.

Також необхідно мати на увазі можливості дифузіофоретичного, термофоретичного і фотофоретичного осадження.

Коагуляція аерозолів головним чином відбувається під впливом теплової дифузії, призводить до зміни дисперсного складу (укрупненню

часток), сприяє довільному осадженню.

Крім того, в пиловловлюючих апаратах створюють умови для коагуляції за рахунок впливу гідродинамічних та акустичних факторів. Фізично коагуляція обумовлена здатністю дрібно-дисперсних часток злипатись між собою та налипати на оточуючі поверхні за рахунок сил молекулярної взаємодії.

6.5. Механізм седиментації

Механізм седиментації або осадження під впливом сили тяжіння може здійснюватися, коли під час горизонтального руху запиленого потоку аерозольні частки з швидкістю вільного падіння досягають поверхні осадження. Фактор турбулентності основного потоку перешкоджає процесу, але для певних геометричних співвідносин (довжина і висота зони осадження) і часток певних розмірів і маси осадження може відбутись.

6.6. Осадження в полі дії електричних сил [18, 19]

Використовується п'ять видів електростатичних сил:

- Кулонівська сила взаємодії між зарядженою перешкодою і зарядженою часткою. Основна сила взаємодії (протягування для різних зарядів) має вигляд:

$$F_1 = eE \cos \theta, \quad (18)$$

де e – заряд електрона;

E – напруженість поля;

θ – кут між напрямком поля і лінією центрів частки і приєднаного іона;

- індукційна сила між зарядженою перешкодою і незарядженою часткою

$$F_2 = \frac{2eE \cos \theta}{(1 + \lambda)^3}, \quad (19)$$

де θ – кут між напрямком поля і лінією наведеного диполя частки,

$$\lambda = \frac{l-r}{r}, \quad (20)$$

l – відстань між перешкодою і часткою, r – радіус частки;

- сила електростатичного відображення між зарядженою часткою незарядженою перешкодою (сферою приєднання)

$$F_3 = \frac{e^4}{4r}, \quad \text{найбільше значення при } \lambda = 1; \quad (21)$$

- сили відштовхування між частками з одноіменними зарядами

$$F_4 = -\frac{eg}{r^2(1+\lambda)^2}, \quad (22)$$

- сила притягання між зарядженою часткою та заземленим колектором (поверхнею осадження).

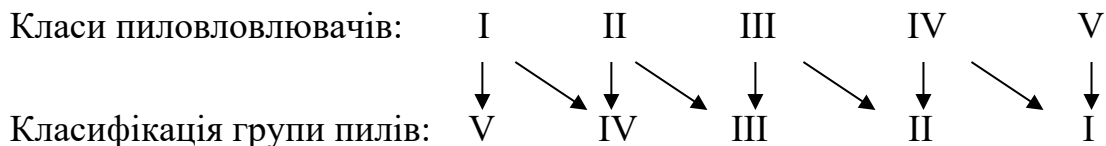
Запитання для самоконтролю

1. Назвіть механізми вловлювання аерозолів.
2. Які сили впливають під час рівномірного руху частинок в повітряному потоці?
3. Якими початковими умовами характеризується нерівномірний рух частинок?
4. В чому полягає процес дифузії і коагуляції?
5. Коли працює процес седиментації частинок?
6. Які види сил діють в електричному полі?

Лекція 14

Тема 7. Пиловловлювачі і фільтри

Основні класи пиловловлювачів і фільтрів для очищення викидів у першу чергу прив'язані до класифікаційних груп пилів.



На основі цієї класифікації створена система класифікації пиловловлювачів і фільтрів (табл. 5).

Таблиця 5

Характеристика пиловловлювачів для очищення повітря

Тип	Вид	Клас ефектності	Область доцільного використання				
			Класифікаційні групи пилу за дисперсністю				
			I	II	III	IV	V
Гравітаційні	Пилоосаджувальні камери (довільна конструкція)	V	+	+	-	-	-
Інерційні	Циклони великої пропускної спроможності:						
	Одиночні циклони ЦН-15, ЦН-24	V	+	+	-	-	-
	Групові циклони ЦН-15	V	+	+	-	-	-
	Циклони високої ефективності:						
	Одиночні циклони СКЦН-34	IV	-	+	+	-	-
	Мокроплівкові циклони ЦВП ВТІ-ПСП	IV	-	+	+	-	-
	Швидкісні промивачі СЮП	III	-	+	+	-	-
	Струминні, мокрі:						

	ПВМ	III	- - + + -	1200-1950
	ПВМК, ПВМС, ПВМБ	II	- - + + -	2000-3000
	Краплинні, типу Вентурі КМП	II	- - + + -	3000-4000

Тип	Вид	Клас ефекти вності	Область доцільного використання					Опір, Па
			Класифікаційні групи пилу за дисперсністю					
			I	II	III	IV	V	
Тка- нинні	Рукавні пиловловлювачі СМЦ-101, СМЦ-166Б, ФВК II (ГЧ-1 Барм),	II	-	-	+	+	-	1200- 1250
	Сітчасті капронові, металеві сітки для вловлювання волокнистого пилу	V	+	-	-	-	-	150- 300
Волок- нисті	Вловлювачі туманів кислот і лугів ФВГ-Т	II	-	-	-	+	-	800- 1000
	Вловлювачі туманів масел (ротаційні)	II	-	-	-	+	-	
1	2	3	4					5
Елек- тричні	Вловлювачі дрібнодисперсного пилу пластинчаті, УГ, ЕГА, УВ	II	-	-	-	+	+	50-100

Характеристики пиловловлювачів, їх типи, види і основні технічні показники представлені в довідковій літературі [6, 18, 19].

7.1. Циклони

Найпоширеніший вид пиловловлювачів це циклони.

За класністю вони можуть бути віднесені до V класу (циклони великої продуктивності) і до IV класу (циклони високої ефективності – одиночні).

Якщо в циклоні для більш надійного утримання відтиснутого до внутрішньої поверхні пилу передбачається зволоження (циклони мокроплівкові – ЦВП та циклони-пробивачі СНОТ), то їхній клас поліпшується до III.

Циклон працює на принципі використання відцентрової сили для виведення з потоку, який обертається, аерозольних часток.

Досвід конструювання та використання привів до встановлення певних співвідношень між головними розмірами, таких як попереджають «коротке замикання», надмірний аеродинамічний опір, забезпечують вільне видалення пилу з конічної частини.

Найпоширеніші циліндричні та конічні циклони серії ЦН (- 11, - 15, -15У, -24) для більшості пилів мінерального походження, циклони Діпродеревпрому серії (Ц) Меркушева, Діпродерева, ОЕКДМ («Клайпеда») призначених для деревообробної промисловості, циклони «ВЦНИИОТ» для абразивних пилів, циклони «ЛИОТ» та «СНОТ» широкого призначення.

7.2. Ефективність пиловловлювачів (ЕП)

Зважаючи на полідисперсний характер механічного складу пилів і встановлений факт окремої здатності пиловловлювачів затримувати матеріальні частки різних розмірів ЕП визначається як повна, фракційна і парціальна.

Повна ефективність (повний коефіцієнт η) оцінюється як відношення маси уловленого ($M_{\text{ул}}$) пилу до маси пилу на вході в апарат ($M_{\text{вх}}$):

Фракційний коефіцієнт очищення $\eta_{\text{ф}}$ оцінюється як відношення маси вловленої кількості фракції до маси фракції на вході в апарат.

Тобто фракційний коефіцієнт дорівнює добутку повного коефіцієнта на відношення вловленої частини певної фракційної кількості $\Phi_{\text{ул}}$ до цієї фракційної кількості на вході $\Phi_{\text{вх}}$.

Парціальний коефіцієнт очищення оцінюється як відношення маси вловленого пилу діаметра до маси часток цього діаметра на вході в апарат.

Значення парціальних ефективностей для різних типів пиловловлювачів (головним чином з використанням сил інерції для криволінійного руху) встановлюється в результаті типових випробувань.

7.3. Фільтри

Очищення газів під час руху їх через пористі середовища називається *фільтрацією*. Відповідно, апарати для очищення газів від пилу шляхом фільтрації називаються *фільтрами*.

Осідання пилу під час фільтрації здійснюється внаслідок торкання, зачеплення, просіювання, а також дії гравітації, інерції і електростатичних сил. Залежно від характеристики частинок пилу, виду фільтруючого пористого середовища і швидкості фільтрації можуть переважати ті чи інші сили, які осаджують пил.

У початковий період, коли в пористому фільтруючому середовищі відсутній пил, частинки пилу акумулюються в порах, а потім нашаровуються на поверхню пористих перегородок, що створює додатковий, нарівні з пористою перегородкою, фільтр для очищення газів. По мірі очищення опір пористих перегородок зростає і фільтри вимагають регенерації або заміни фільтруючого матеріалу.

Велика різноманітність конструкцій фільтрів умовно можна розділити залежно від призначення на три класи:

Фільтри тонкого очищення уловлюють з високою ($> 99 \%$) ефективністю субмікронні частинки з низькою ($< 1 \text{ мг/м}^3$) вхідною концентрацією, мають малу швидкість фільтрації, не регенеруються. *Повітряні фільтри* застосовують у системах вентиляції і кондиціонування повітря, якщо концентрація пилу до 50 мг/м^3 і висока швидкість фільтрації, можуть підлягати або не підлягати регенерації. *Промислові фільтри* використовують для очищення промислових газів концентрацією до 60 г/м^3 , регенеруються. Фільтрувальні пористі перегородки поділяються на гнучкі, напівжорсткі та жорсткі, крім того застосовуються зернисті шари матеріалів.

Серед фільтрів промислового застосування слід виділити *волокнисті, зернисті і тканинні фільтри*.

Запитання для самоконтролю

1. Розкрийте поняття повної ефективності.
2. Що таке фракційна ефективність?
3. Що таке парціальна ефективність циклона?
4. Які сили діють під час процесу фільтрації?
5. Дайте класифікацію фільтрів за призначенням.

Лекції 15-17

Тема 8. Засоби очищення газових викидів

8.1. Основні положення щодо очищення газових викидів

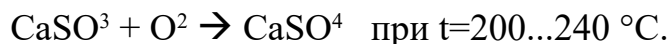
Газоочищення – це складний технологічний процес. Залежно від фізико-хімічних властивостей забруднювачів використовуються абсорбція, адсорбція, конденсація, хімічне перетворення, термічне і термокаталітичне окислення, біологічні методи [18...20].

Абсорбційне очищення полягає у створенні умов контакту забрудненого викидного повітря (газів) з рідиною, яка виступає в ролі розчинника забруднювача. Залежно від здатності до розчинення використовують водні і неводні системи.

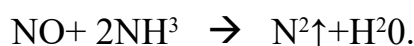
Адсорбція полягає в притягненні і утриманні інших речовин (газів і рідин) частинками (атомами, молекулами, іонами) твердої речовини, які знаходяться в поверхневому шарі. Як адсорбенти використовують спеціально підготовлені речовини з розвиненою поверхнею: активоване вугілля, силікагель, синтетичні цеоліти, алюмогель, відбілюючи і діатомові землі. Рівновага процесу адсорбції характеризується ізотермою й ізобарою адсорбції. Головні показники для розрахунку адсорбції – це адсорбційна ємність (активність) адсорбентів і їхня поверхня.

Хімічні методи очищення стосуються головним чином оксидів азоту NO^x і оксидів сірки SO^x . Використовуються некаталітичний і каталітичний процеси поновлення азоту сполук типу NO і NO_2 у результаті домішування аміаку в димові гази за температури $900...1000\text{ }^\circ\text{C}$ і в реакторах у присутності каталізатора V_2O_5 за температури газів $300...400\text{ }^\circ\text{C}$.

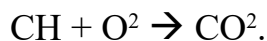
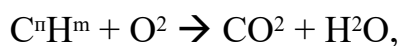
Хімічний спосіб очищення відхідних газів від SO_2 полягає в переведенні газоподібної сіркоутримуючої домішки в нерозчинну тверду фазу в реакціях типу.



За реагент, крім вапна, використовують і вапняк. Крім того, існує хімічний спосіб одночасного вилучення SO_2 і NO в процесі з використанням CuO/CuSO_4 . Спочатку поглинається оксид сірки $\text{SO}_2 + \text{CuO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CuSO}_4$ за $t = 390 \text{ } ^\circ\text{C}$, в другій стадії відбувається поновлення азоту в присутності CuSO_4 .



Певні групи летких органічних сполук (VOCs), а також CO можуть бути вилучені з атмосферного викиду шляхом їх допалювання. Обмеження способу наступає за наявності у викиді галогенів або інших контамінантів (P, S), які під час термічної обробки дають вихід речовин більш токсичних, ніж вихідна суміш. Отже, здійснюються реакції окислення:



Ефективність процесу допалювання – η , визначається рівнянням:

$$\ln \frac{1}{1-\eta} = A \cdot \tau \cdot 2(T_K - T_B),$$

де A – характеристика турбулентного перемішування суміші;

t – час перебування в камері допалювання; T_K – температура в камері;

T_B – температура запалювання компонента.

Використовуючи метод, мають місце підвищені витрати теплоти, яку не завжди можна застосовувати. Тому розроблений термokatалітичний метод, під час використання якого процес здійснюється за знижених температур. Температура допалювання в присутності каталізатора Pt для

парів органічних розчинників, стиролу, фенолу, ацетону становить 200 °С, під час використання Pd температура процесу становить 380...400 °С.

Існують інші каталізatori. Каталітичні реакції можуть відбуватися в трьох областях лімітування процесу: кінетичній, зовнішньо-дифузійній і внутрішньо-дифузійній. Відповідно рушійною силою процесу є або функція концентрації в суміші, або відповідний показник ефективності дифузії і градієнт концентрації в напрямку до каталітично-активної поверхні. Каталітична активність визначається як міра прискорення реакції в присутності каталізатора порівняно зі звичайними умовами допалювання.

8.2. Абсорбційний метод очищення газових викидів

Абсорбція – фізико-хімічний процес вибіркового поглинання газів рідиною з утворенням розчинів. Десорбція – процес виділення газу з рідини. Речовину, яка міститься в газовій фазі й під час абсорбції переходить в рідку, називають абсорбційним компонентом або абсорбтивом. Речовину, яка міститься в газовій фазі й під час абсорбції не переходить в рідку, називають газом-носієм або інертним газом.

Абсорбент (поглинач) – речовина, в якій відбувається розчинення абсорбуючих компонентів газу, що очищається.

Абсорбер – апарат, в якому відбувається процес абсорбції.

Абсорбцію підрозділяють на фізичну та хімічну (хемосорбцію).

Під час фізичної абсорбції відбувається фізичне розчинення абсорбованого компонента в розчині, що не супроводжується хімічною реакцією. Абсорбція відбувається у випадку, якщо парціальний тиск абсорбованого компонента в газовій фазі більше його рівноважного

парціального тиску компонента над цим розчином. Чим більша різниця між цими тисками, тим більша рухома сила процесу й тим швидше відбувається абсорбція.

Для багаторазового використання абсорбент (поглинач) регенерують фізичними методами: підвищенням температури, зниженням тиску або сукупністю цих параметрів.

Якщо компонент, що поглинається, не має ніякої цінності або процес регенерації дуже трудомісткий, то поглинач використовують декілька разів і після відповідної обробки скидають в каналізацію. Це не є оптимальним рішенням, оскільки забруднюється водне середовище. Метод, що поєднує абсорбцію з десорбцією, дає змогу не тільки добувати корисні компоненти з газових систем і знизити до мінімуму витрати абсорбента, але й відповідає вимогам захисту довкілля.

В якості поглинальних розчинів під час фізичної абсорбції використовують воду, а також органічні й неорганічні розчини, які не вступають в хімічну реакцію з абсорбувальними компонентами. Ефективність добування компонента з газової суміші під час фізичної абсорбції підвищують використанням принципу протитоку з безперервною подачею в абсорбер свіжого розчину.

Під час хемосорбції абсорбувальний компонент вступає в хімічну реакцію з поглиначом, утворюючи нові хімічні з'єднання рідкій формі. Водночас можливі два варіанти – протікання оборотних і необоротних реакцій. В обох випадках рівноважний парціальний тиск компонента, від якого очищається газ, значно нижчий в порівнянні з фізичною абсорбцією. У зв'язку з цим хемосорбційні процеси за рівних умов з фізичною абсорбцією забезпечують повніше добування компонентів з газових сумішей. Регенерацію поглинальних розчинів виконують фізичними й хімічними методами. Фізичні методи використовують під час протікання оборотних хемосорбційних процесів, а хімічні – необоротних хемосорбційних процесів.

Як поглинальні розчини в процесі хемосорбції використовують водні розчини солей та органічних розчинників. Поглинальні розчини повинні

мати високу поглинальну спроможність й селективність відносно до компонента, який добувається, бути термічно стійкими й спроможними до регенерації, не викликати корозію апаратів та мати невисоку ціну.

Універсальних поглинальних розчинів, що однаковою мірою задовольняють всі вимоги, в практиці абсорбційного очищення газових викидів не існує. В кожному конкретному випадку вибирають абсорбент, який відповідає головним критеріям оптимізації, що можуть бути різними для різних процесів. Як поглинальні розчини використовують водні розчини лугів, кислот, солей, спиртів та органічних розчинників. Поглинальний розчин повинен мати незначну в'язкість та температуру кипіння більшу, ніж води (150°C і більше).

Оптимальні умови процесів абсорбційного очищення газів забезпечуються відповідним співвідношенням між концентраціями речовин, що беруть участь в абсорбційному процесі, в момент рівноваги, та швидкістю, з якою така рівновага встановлюється.

8.2.1. Рівновага в системі газ-рідина

Для вибору оптимальних умов процесу очищення газових викидів від газо- й пароподібних забруднень абсорбційними методами необхідно розглянути з позицій термодинаміки співвідношення між концентраціями рідкої й газової фаз, що встановлюються протягом суттєвого часу дотику фаз. Рівновага визначається термодинамічними властивостями компонента, що добувається, і поглинального розчину та залежить від концентрації, температури й тиску фаз [19].

Склад газової й рідкої фаз виражається такими величинами:

- об'ємна концентрація: C , кмоль/ м^3 або $\bar{C}$, кг/ м^3 ;
- мольна частка для газової фази: y , мольн. частки, $\bar{y}$, масової частки;
- мольна частка для рідкої фази: x , мольн. частки, $\bar{x}$, масової частки;
- відносна концентрація для газової фази: Y , кмоль/кмоль, $\bar{Y}$, кг/кг;
- відносна концентрація для рідкої фази: X , кмоль/кмоль, $\bar{X}$, кг/кг;
- парціальний тиск компонента для газової фази: P_k , Па.

Фізична система (рис.15) включає 3 компоненти:

- повітря (інертний газ);
- газ, що поглинається (домішок);
- рідина, що абсорбує (вода або розчинник).

-

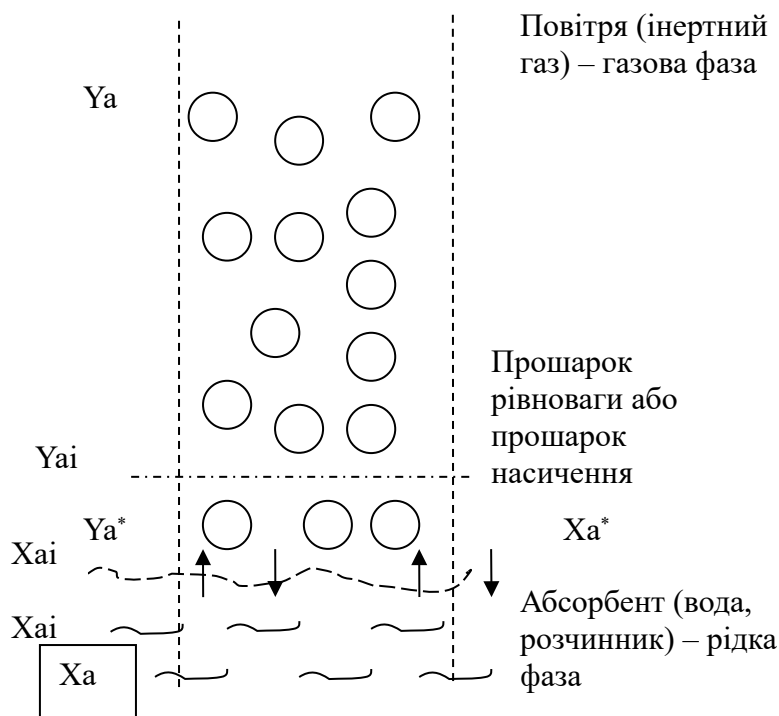


Рис.15. Фазова система «газ – рідина»

Правило фаз (визначає фазову рівновагу):

число компонентів (K) + 2 дорівнює числу фаз (Φ) + число параметрів (N), які можна змінювати без порушення рівноваги в системі.

У системі «газ – рідина»: $N = K + 2 - \Phi = 3$. Параметри N :

X – концентрація в рідині, P_p – парціальний тиск над рідиною, t – температура.

Під час абсорбції перехід компонента з газової фази в рідку продовжується до тих пір, поки парціальний тиск компонента в газовій фазі стане рівним тиску цього компонента над розчином.

Стан рівноваги між концентрацією газу в газовій та рідкій фазах характеризується константою фазової рівноваги (коефіцієнтом розподілу), яка дорівнює відношенню концентрації компонента в газовій фазі до його концентрації в рідкій фазі.

За заданою температурою рівняння фазової рівноваги мають вигляд

$$Y_a^* = m_{YX} \cdot x, \text{ де} \quad (23)$$

m_{YX} - константа фазової рівноваги, б/р (безрозмірна величина); або

$$P_a^* = m_{PX} \cdot x, \quad \text{де} \quad (24)$$

m_{PX} - константа Генрі, Па;

$$P_a^* = Y_a^* \cdot P_K, \quad \text{де} \quad (25)$$

Y_a^* – мольна доля компонента в шарі насичення.

8.2.2. Класифікація технологічного обладнання для абсорбційного очищення газових викидів

Для вирішення технологічних задач з очищення викидів газів від газо- й пароподібних речовин використовують різні за конструктивними особливостями абсорбери. Класифікація абсорберів [18]:

- Поверхневі: насадочні, плівкові;
- Барботажні: з суцільним барботажним шаром, тарілчастого типу, з плаваючою насадкою, з механічним перемішуванням рідини;
- Розпилювальні: пустотілі форсуночні, труби Вентурі, з механічним розпилюванням;
- Ежекторні;
- Вихрові: односекційні, двосекційні;
- Циклонно-пінні: однополичні, багатополичні.

У поверхневих (насадкових) абсорберах (рис. 16) контакт газу з рідиною відбувається на змоченій поверхні насадки, по якій стікає зрошувальна рідина. Залежно від щільності зрошування й швидкості газового потоку насадкові абсорбери можуть працювати в різних гідродинамічних режимах: плівковому, підвішування, емульгування та винесення.



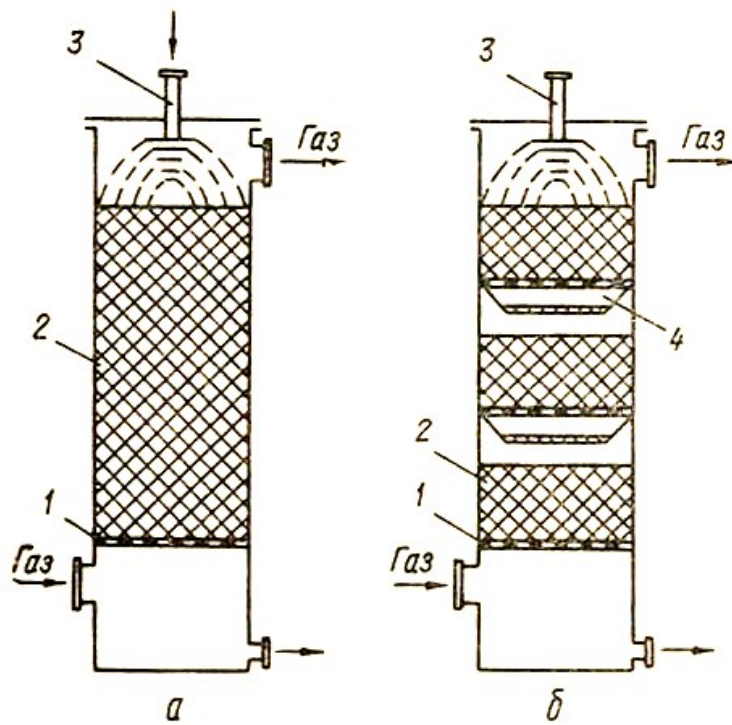


Рис. 16. Насадні абсорбери:

a – з суцільним завантаженням; *б* – з пошаровим завантаженням насадки;

1 – решітка, 2 – насадка, 3 – зрошуючий пристрій,

4 – перерозподільний пристрій рідини

Ефективність роботи абсорбера визначається типом насадки та її укладанням. Насадка повинна мати малий гідравлічний опір, рівномірно розподіляти рідину, мати високу механічну міцність, добре змочуватися, мати малу насипну густину, не забиватися та не мати антикорозійних властивостей. Використовують такі типи насадок: кільцеві (кільця Рашіга, кільця Лессінга, кільця Палля), сідлові (сідла Берля, сідла Інталокс); хордові; плаваючі та блочні.

Принцип роботи барботажних абсорберів ґрунтується на проходженні (барботажі) бульбашок газу через шар рідини. Поверхня масообміну в барботажних абсорберах, де рідина є суцільною фазою, а газ – дисперсною, еквівалентна сумарній поверхні бульбашок газу або піни, що утворюються при барботажі.

Абсорбери з суцільним барботажним шаром виконують у вигляді пустотілих циліндрів, у нижній частині яких установлюють перфоровану

плиту, що призначена для подрібнення потоку газу на струмені. Недоліком абсорберів з суцільним барботажним шаром є невелика швидкість руху газу (0,3...0,4 м/с) та наявність повздовжнього перемішування рідини, що знижує інтенсивність масопередачі.

Барботажні абсорбери тарілчастого типу використовують для збільшення ступеня очищення газу. В цих апаратах по висоті установлюють декілька полицок, що мають назву тарілки. Залежно від конструкції тарілок та швидкості пропускання газу розрізняють три гідродинамічні режими роботи барботажних абсорберів: бульбашковий, пінний та струминний.

Для очищення газів, що містять тверду фазу, використовують абсорбери з плаваючою насадкою. Ці апарати мають високу ефективність у разі значного гідравлічного опору. Швидкість газового потоку становить 2...5 м/с. Як насадку використовують пустотні кулі або суцільні з отворами, а також куби, піраміди, кільця Рашіга, диски. Використовують такі типи абсорбційних апаратів з плаваючою насадкою: багато полицний абсорбер з насадкою, що обертається; абсорбер з рухомою насадкою, що обертається; абсорбер з направляючим конусом; абсорбер із скрученим профілем решітки, абсорбер з вертикальною перегородкою.

Розпилювальні абсорбери (рис. 17) є конструктивно простими, високопродуктивними, мають малий гідравлічний опір та можуть працювати в широкому діапазоні навантаження за газом й рідиною. Принцип їх роботи ґрунтується на розпилюванні рідини в потоці газу. Їх недоліком в порівнянні з барботажними апаратами є менша ефективність при абсорбції погано розчинних газів. За способом утворення міжфазної поверхні розпилювальні абсорбери поділяють на форсункові, швидкісні, прямооточні, механічні.

Міжфазна поверхня у форсункових абсорберах формується за рахунок розпилення рідини в апараті різними за конструкцією форсунками. За механізмом дроблення струменя рідини форсунки бувають механічні, пневматичні та з обертовим робочим органом.

За принципом механічної дії форсунки бувають струминні, центробіжні, ударної дії та комбіновані. Ефективність дроблення на краплі визначається швидкістю витікання струменя з сопла або каналів форсунки.

В атмосферу

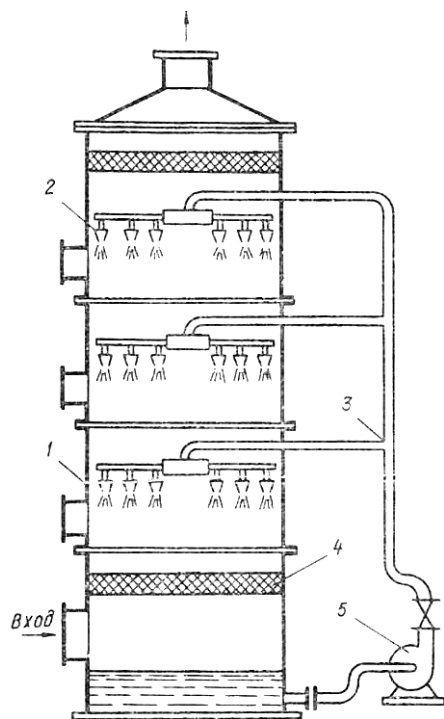


Рис. 17. Конструктивна схема форсункового абсорбера:

1 – корпус; 2 – форсунка; 3 – колектор; 4 – розподільчий екран; 5 – насос

У прямоточних розпилювальних абсорберах розпилення рідини здійснюється за рахунок енергії газового потоку. За способом утворення міжфазної поверхні швидкісні прямоточні розпилювальні абсорбери поділяються на апарати: в яких рідина розпилюється за рахунок енергії газового потоку при плівковому, струйному або форсунковому вводі рідини; і в яких рідина розпилюється за рахунок енергії газу під час удару газового потоку о поверхню рідини.

Принцип роботи механічних розпилювальних газопромивачів ґрунтується на інтенсифікації масообміну шляхом розбризкування чи перемішування рідини або крутінні зволоженого газового потоку за допомогою обертового пристрою у вигляді ротора, диска.

За способом розміщення ротора механічні абсорбери діляться на вертикальні та горизонтальні. Залежно від способу підведення механічної енергії апарати підрозділяють на такі, в яких газ, що очищується, приводиться в дотик з рідиною, розбризкуванню за допомогою обертового

тіла та в яких механічна енергія підводиться додатково для крутіння газового потоку.

Недоліками механічних абсорберів є наявність обертових частин, відносно мала продуктивність та значні витрати електроенергії.

Існує велика кількість абсорбційних апаратів, принцип дії яких базується на інтенсивному перемішуванні і високих швидкостях взаємодіючих фаз. Переважно такі апарати комбінованого типу, в яких використовуються елементи поверхневих, барботажних і розпилювальних абсорберів.

Циклоннопінні апарати являють собою варіант пінних абсорберів. Наявність тангенціального підводу і високої швидкості руху газу (до 7 м/с) забезпечує високотурбулентний режим взаємодії фаз, що збільшує ефективність їх роботи. Вони відрізняються невеликою енергомісткістю, не забруднюються в процесі обробки газу з твердими домішками і мають невеликий гідравлічний опір. Залежно від способу утворення закрученого потоку циклоннопінні апарати поділяють на равликові, тангенціальним підводним і осьовим підводним патрубком і завихрювачем.

У равликових апаратах для завихрювання і рівномірної подачі потоку газу використовується равлик, який встановлюється на вході в апарат.

В апаратах з тангенціальним підводним патрубком для спрощення конструкції замість равлика використовується тангенціальний патрубок.

В апаратах з осьовим підводним патрубком і завихрювачем для завихрювання потоку перед його подачею в активний об'єм апарата можуть застосовуватися завихрювачі різних конструкцій.

Для збільшення ступеня очистки газу використовують багатополічні циклоннопінні апарати з декількома контактними пристроями, які встановлюють по висоті апарата.

Такі апарати мають різну ефективність, метало - і енергомісткість, складність виготовлення. Всі ці параметри мають враховуватись під час їх виборі для санітарної очистки газових викидів.

8.3. Адсорбційний метод очищення газових викидів

Адсорбери – це апарати, в яких видалення з газового середовища газо- та пароподібних домішок відбувається внаслідок поглинання поверхневим шаром твердих речовин-адсорбентів.

Адсорбери поділяються на апарати періодичної дії (з нерухомим шаром адсорбенту) та безперервної дії – з шаром адсорбенту, що рухається або знаходиться у псевдозрідженому стані. Як адсорбенти переважно використовуються активоване вугілля, силікагелі ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), цеоліти ($\text{Me}_2/n \text{ O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$) та іоніти. Вибір типу адсорбенту зумовлений його здатністю до поглинання конкретного забруднення, а також особливостями проходження процесу.

У техніці газоочищення найпоширенішими є адсорбери з нерухомим шаром адсорбенту. Для невеликих витрат парогазової суміші здебільшого використовують вертикальні (рис. 18 а, в) а для великих – горизонтальні або кільцеві конструкції (рис. 18, б).

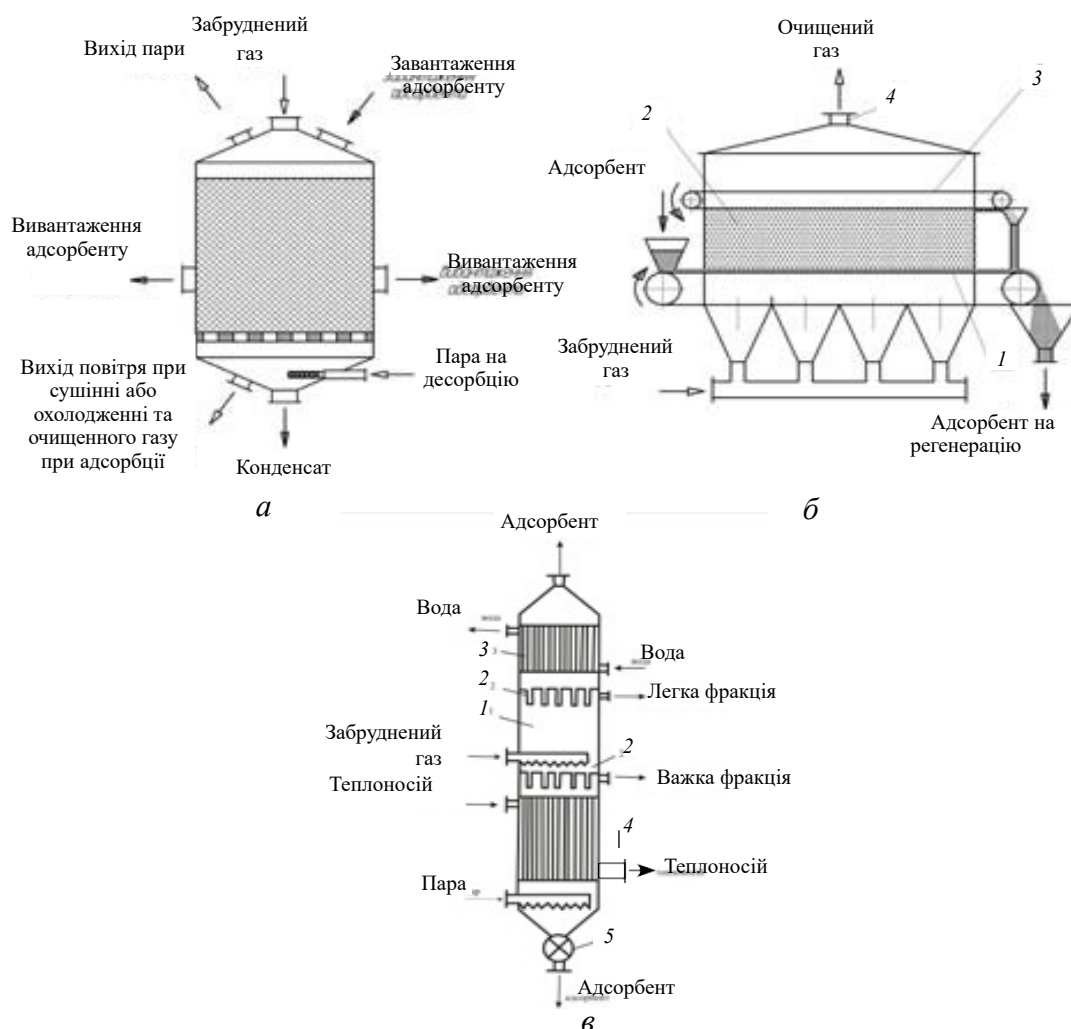


Рис. 18. Конструкції адсорберів:

а – періодичної дії; б, в – із шаром адсорбенту, що рухається

Адсорбент розміщують на ґратах, а подачу газу здійснюють згори вниз. Після повного насичення адсорбенту подачу парогазової суміші припиняють, а у зворотному напрямку крізь шар поглинача пропускають десорбуючий агент. Якщо останнім є водяна пара, то після закінчення десорбції шар адсорбенту спочатку сушать, а потім охолоджують, пропускаючи крізь нього зверху вниз відповідно гаряче та холодне повітря. Сконденсована пара видаляється з нижньої частини апарата. Рекупераційні установки зазвичай включають у себе декілька таких апаратів, у кожному з яких послідовно проходять фази адсорбції, десорбції (регенерації поглинача витісненням або випарюванням), сушіння (нагрітим повітрям) і охолодження (атмосферним повітрям). Існують установки, що працюють за трифазним (без сушіння або охолодження) або двофазним (адсорбція і десорбція) циклами. У будь-якому випадку частина адсорбентів постійно працює у режимі поглинання, так що установка діє безперервно.

Форма адсорберів може бути циліндричною, конічною, конічноциліндричною та призматичною. Конічні апарати з малими кутами розкриття конусу дають змогу отримати найкращі гідродинамічні характеристики (симетричний профіль швидкостей газу в різних поперечних перерізах апарата), а також рівномірне псевдозрідження під час використання адсорбентів, неоднорідних за своїм гранулометричним складом. Циліндрична форма апарата за гідродинамічними показниками поступається конічній, але внаслідок конструктивних переваг циліндричні апарати знаходять широке застосування у промисловості. Ще гірші гідравлічні характеристики мають апарати прямокутного перерізу. Найбільш широке використання у промисловості знаходять конічноциліндричні апарати.

Запитання для самоконтролю

1. Охарактеризуйте засоби очищення газових викидів.
2. Поясніть суть абсорбційного методу очищення газових викидів.
3. Від чого залежить рівновага фаз в системі рідина-газ під час абсорбційного процесу?
4. Наведіть класифікацію абсорберів.
5. Охарактеризуйте принцип роботи насадкових, барботажних, розпилювальних та циклоннопінних абсорберів.
6. Що використовують в якості адсорбентів?

7. Наведіть конструкції адсорберів за формою, рухомістю шару адсорбенту. Назвіть їх недоліки і переваги.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *John H. Atmospheric chemistry and physics. From Air Pollution to Climate Change* / John H. Seinfeld. Spyros N. Pandis. A. Wiley – Interscience publication. John Wiley & sons, inc., 1998. – 132 p.
2. *G. Tyler Miller. Jr. Living in the environment.* / G. Tyler Miller. Sevent edition. Wadsworth Publishing Company. Belmont. - California: 1992. – 706 p.
3. *Дударєва Г. Ф. Метеорологія та кліматологія : навчально-методичний посібник* / Г.Ф. Дударєва. – Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2021. – 120 с.
4. *Howard Brsdgman. Global air pollution. Problems for the 1990s.* London, Berlhaven Press. 1990. – 262 p.
5. *Трофімович В.В. Основи екології: навчальний посібник* / В.В. Трофімович. – Київ : ІЗМН, 1996. – 212 с.
6. *Зацеркляний М. М. Процеси захисту навколишнього середовища: підручник* / М. М. Зацеркляний, О. М. Зацеркляний, Т. Б. Столевич. – Одеса : Фенікс, 2017. – 454 с.
7. Викиди CO₂ провідних країн світу [електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://minprom.ua/news/313573.html>. / (дата звернення: 5.01.2026). – Назва з екрана.
8. *Біляєв М. М. Мінімізація рівня хімічного забруднення атмосферного повітря на відкритій місцевості: монографія* / М. М. Біляєв, Т. І. Русакова, О. В. Берлов. – Дніпро: Журфонд, 2021. – 198 с.
9. Порядок визначення величин фонових концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів № 793 від 21.04.2025.
10. *Законі України «Про охорону атмосферного повітря»* / Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1992. - №50.- ст. 678.
11. Порядок здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 14 серпня 2019 року № 827.

12. *Висновки* Європейської Ради по Україні (21/03/2014) [електронний ресурс] – Режим доступу: http://eeas.europa.eu/delegations/ukraine/press_corner/all_news/news/2014/2014_03_21_02_uk.htm. (дата звернення: 10.02.2026). – Назва з екрана.
13. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів: ДСП-173-96. – [Чинний від 1996–06-19]. – Київ: Укрархбудінформ, 2002. – 59 с.
14. Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць. Наказ МОЗ України №813 від 10.05.2024.
15. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць: ДСП-201-97. [Втратив чинність]. – Київ: МОЗ України, 1997. – 58 с.
16. Порядок інформування населення про якість повітря за основними показниками з використанням індексу якості повітря в Україні. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів № 590 від 24.03.2025.
17. Опалення, вентиляція та кондиціонування: ДБН В.2.5-67:2013. – [Чинний від 2014–01-01]. - Київ: Мінрегіон України, 2013. – 54 с.
18. *Мартиненко С.А.* Сучасні технології захисту атмосфери : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів екологічного профілю / С. А. Мартиненко. – Кропивницький : ЦНТУ, 2019. – 155 с.
19. *Петрук В.Г.* Технології захисту навколишнього середовища. Ч. 1. Захист атмосфери: підручник / В.Г. Петрук, І.В. Васильківський, Р.В. Петрук та ін. – Херсон : Олді-плюс, 2019. – 432 с.
20. *Ратушняк Г.С.* Засоби очищення газових викидів: навчальний посібник / Г.С. Ратушняк, О. Г. Лялюк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2008. – 207 с.

Навчальне видання

ВОЛОШКІНА Олена Семенівна
КЛІМОВА Ірина Володимирівна

ІНЖЕНЕРНІ МЕТОДИ ЗАХИСТУ АТМОСФЕРИ

Конспект лекцій

Редагування та коректура *Ю.М. Долгополової*
Комп'ютерне верстання *А.П. Селівестрової*

Підписано до друку 29.06. 2026. Формат 60 × 84_{1/16}
Ум. друк. арк. 4,42. Обл.-вид. акр. 4,75
Електронний документ. Вид. № 20/І-26.

Видавець і виготовлювач
Київський національний університет будівництва і архітектури

Проспект Повітряних сил України, 31, Київ, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002

