

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

В. Є. БЕСЕТОВ, Г. П. ЄВТУХОВА, Ю. Л. КОВАЛЕНКО

**КОНСПЕКТИ ЛЕКЦІЙ**

*із курсу*

**ПРИКЛАДНА АЕРОЕКОЛОГІЯ**

**МОДУЛЬ 1**

**«АТМОСФЕРА. ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ»**

*(для студентів 2 курсу денної форми навчання  
за напрямом 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього  
середовища та збалансоване природокористування»)*



**ХАРКІВ**  
**ХНАМГ**  
**2011**

**Бекетов В. Є.** Конспект лекцій із курсу «Прикладна аероекологія». Модуль 1 «Атмосфера. Основні терміни та визначення» (для студентів 2 курсу денної форми навчання за напрямом 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; В. Є. Бекетов, Г. П. Євтухова, Ю. Л. Коваленко. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 44 с.

Автори: В. Є. Бекетов,  
Г. П. Євтухова,  
Ю. Л. Коваленко

Рецензент: проф., д.т.н. Ф. В. Стольберг

Рекомендовано кафедрою інженерної екології міст,  
протокол № 2 від 22.10.2010 р.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	<b>4</b>
<b>ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1.1. ЗАБРУДНИКИ АТМОСФЕРИ. ДЖЕРЕЛА ВИКИДІВ.</b>	
<b>1. АТМОСФЕРА, ЇЇ СКЛАД, БУДОВА ТА ФУНКЦІЇ</b> .....	<b>5</b>
1.1. Чинники, що зумовлюють пересування повітряних мас.....	7
1.2. Природні ресурси атмосфери.....	8
<b>2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДЖЕРЕЛ І РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ</b> .....	<b>10</b>
2.1. Класифікація джерел забруднення атмосфери.....	11
<b>3. ФІЗИЧНІ ТА ХІМІЧНІ ЗАБРУДНЮВАЧІ АТМОСФЕРИ</b> .....	<b>13</b>
3.1. Фізичні забруднювачі атмосфери.....	13
3.2. Хімічні забруднювачі атмосфери.....	14
<b>4. ХАРАКТЕРИСТИКА Й ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ ДОМІШОК АТМОСФЕРИ</b> ....	<b>17</b>
4.1. Оксид вуглецю (CO).....	17
4.2. Діоксид сірки (SO <sub>2</sub> ).....	18
4.3. Вуглеводні (C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> ).....	18
4.4. Оксиди азоту (NO <sub>x</sub> ).....	18
4.5. Аерозолі.....	19
4.6. Діоксид вуглецю (CO <sub>2</sub> ).....	21
<b>5. ХІМІЧНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ (ТРАНСФОРМАЦІЯ) ДОМІШКІВ В АТМОСФЕРІ</b> ....	<b>22</b>
5.1. Трансформація сполук вуглецю.....	23
5.2. Трансформація метану.....	23
5.3. Трансформація сполук сірки.....	24
5.4. Трансформація сполук азоту.....	26
<b>6. СМОГ І ЙОГО ВИДИ</b> .....	<b>28</b>
6.1. Фотохімічний смог.....	28
6.2. Лондонський смог.....	28
6.3. Крижаний смог.....	29
<b>ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1.2. ВЛАСТИВОСТІ ПИЛУ ТА ГАЗІВ.</b>	
<b>7. ОСНОВНІ ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПИЛУ ТА ГАЗІВ</b> .....	<b>30</b>
7.1. Щільність пилу.....	30
7.2. Дисперсний склад пилу та способи його завдання.....	30
7.2.1. Табличний спосіб.....	31
7.2.2. Графічний спосіб.....	31
7.2.3. Аналітичний спосіб.....	33
7.3. Аутогезійонні властивості пилу.....	35
7.4. Сипучість пилу.....	36
7.5. Абразивність пилу.....	36
7.6. Електричні властивості пилу.....	37
7.7. Змочуваність пилу.....	37
7.8. Пожежо- та вибухонебезпечні властивості пилу.....	38
<b>8. ВЛАСТИВОСТІ ГАЗІВ</b> .....	<b>39</b>
8.1. Способи завдання компонентного складу газів.....	39
8.2. Щільність, в'язкість і теплоємність суміші газів.....	40
8.3. Вологість газів і способи її завдання. Зв'язок між параметрами.....	41
вологого повітря, «I-D» діаграма.....	41
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	<b>44</b>

## ВСТУП

Дисципліна «Прикладна аероекологія» входить до програми підготовки бакалавра за напрямом 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування».

У конспекті лекцій розглянуто питання, що стосуються атмосфери, її складу, будови та функцій, наведено характеристику та класифікацію джерел забруднення атмосфери; описано фізичні та хімічні забруднювачі атмосфери, схарактеризовано основні домішки в атмосфері; розглянуто основні фізико-хімічні властивості пилу та газів.

Дисципліна дає студентові знання, за допомогою яких можна проводити розрахунки параметрів атмосфери в різних її точках, розрахувати параметри пилогазової суміші, необхідні для визначення ефективності роботи газоочисного устаткування.

## Змістовий модуль 1.1.

### Забрудники атмосфери. Джерела викидів

#### 1. Атмосфера, її склад, будова та функції

Атмосфера - зовнішня газова оболонка Землі, механічна суміш різних газів, водяної пари та твердих (аерозольних) часток.

Склад атмосфери перебуває у стані динамічної рівноваги, що підтримується такими кліматичними чинниками, як переміщення повітряних мас (вітер і конвекція) й атмосферні осідання, життєдіяльність тваринного та рослинного світів, особливо лісів і планктону світового океану, а також за допомогою космічних процесів, геохімічних явищ і господарської діяльності людини.

Зразковий хімічний склад атмосферного повітря (у об'ємних відсотках в перерахунку на сухе повітря) виглядає наступним чином:

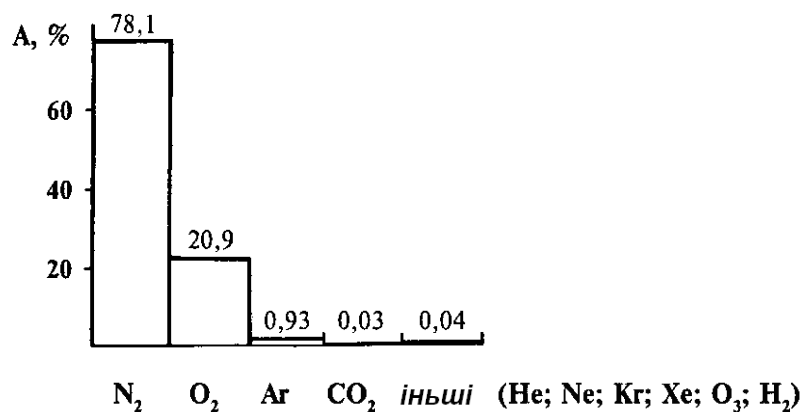


Рис. 1.1 – Хімічний склад атмосферного повітря (у об'ємних відсотках): азот ( $N_2$ ) - 78,1%; кисень ( $O_2$ ) - 20,85%; аргон (Ar) - 0,93%; діоксид вуглецю ( $CO_2$ ) - 0,033%; на долю інших компонентів - неон (Ne), гелій (He), криптон (Kr), ксенон (Xe), озон ( $O_3$ ), водень ( $H_2$ ) становить не більше 0,04%; склад водяної пари коливається в інтервалі 0,01 - 4%.

Загальна маса атмосфери складає  $5,14 \cdot 10^{15}$  т. Приблизно 50% маси атмосфери належить ніжньому шарові завтовшки 5 км. Маса шару, що має товщину 30 км, складає 99% усієї маси атмосфери.

За вертикаллю атмосфера має шароподібну будову. Виділення окремих зон (табл. 1.1) ґрунтується на зміні температури відносно висоти.

Верхня межа атмосфери чітко не виділяється. Вона переходить поступово в космічний простір.

Таблиця 1.1. – Характеристика основних зон, що виділяються в атмосфері

Зона атмосфери	Верхня та нижня межі зони від рівня моря, км.	Температура °С	
		нижня межа зони	верхня межа зони
тропосфера	0-11	+ 15	-56
стратосфера	11 - 50	-56	-2
мезосфера	50 - 85	-2	-92
термосфера	85 - 500	-92	+ 1200

Середня температура атмосфери в середніх широтах зменшується з висотою до відмітки 11 км за лінійним принципом. При цьому середня температура на рівні моря приймається рівною 288 К, а на висоті 11 км - 216,7 К (Рис. 1.2).

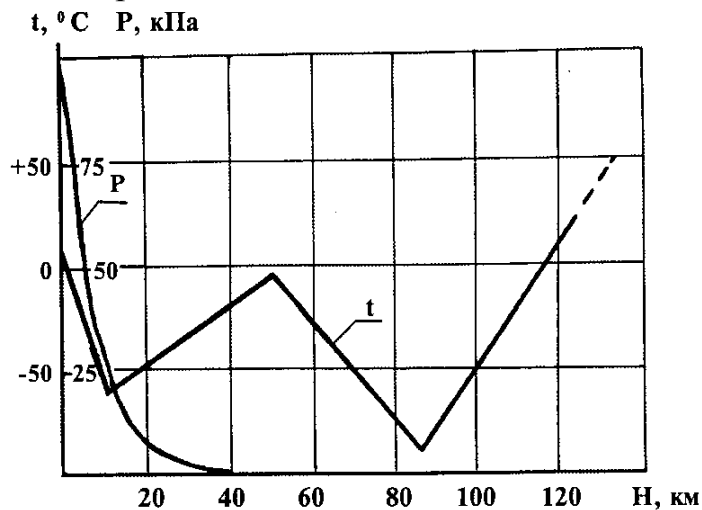


Рис. 1.2 – Розподіл тиску та температури атмосферного повітря за висотою (за певних середніх умов)

Відповідно до вищевказаного, стандартний або нормальний температурний градієнт дорівнює:

$$-\left(\frac{dT}{dH}\right)_{\text{станд}} = (288 - 216,7)/10,8 \times 10^3 = 0,0066 \text{ К/м.}$$

Середній атмосферний тиск на рівні моря складає 101,3 Кпа.

За умов, що відповідають середньому тискові на рівні моря й багаторічній середньорічній температурі атмосферного повітря на рівні моря, рівною 15<sup>0</sup>С, розподіл тиску з висотою визначається за міжнародною барометричною формулою:

$$P(H) = 101,3(1 - 6,5H/288)^{5,255}, \text{ кПа}$$

де  $P$  – тиск,  $kПа$ ;  $H$  – висота над рівнем моря, км.

Сонце, Земля та земна атмосфера утворюють одну велику динамічну систему.

### **1.1. Чинники, що зумовлюють пересування повітряних мас**

Пересування повітряних мас є результатом дії наступних чинників:

1. Горизонтальні градієнти тиску, які виникають унаслідок відмінностей у нагріванні повітря та є причиною конвекцій й горизонтальних пересувань повітряних мас;

2. Сила Коріоліса, що виникає унаслідок обертання Землі.

**КОРІОЛІСА СИЛА** – сила інерції, за допомогою якої враховується вплив обертання системи відліку на відносний рух матеріальної крапки. Цей вплив виявляється в тому, що в системі відліку, яка обертається, рухома матеріальна точка або відхиляється за напрямом, перпендикулярним її відносній швидкості, або тисне на зв'язок, що перешкоджає такому відхиленню.

Наприклад, добовий оберт Землі призводить до того, що річки, поточні меридіональному напрямку, підмивають правий берег Північної півкулі (за течією), в Південному - лівий.

3. Відцентрове прискорення, що виникає в районах, прилеглих до областей високого та низького тиску;

Рух повітряних потоків довкола центрів високого тиску здійснюється за годинниковою стрілкою з відхиленням назовні і донизу від колового руху. Цей потік отримав назву низхідного і однією з можливих перешкод для розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері. Під час руху повітря довкола центру високого тиску в північній півкулі за годинниковою стрілкою формується **антициклон**.

Під час руху повітряних потоків навколо центрів низького тиску вектор швидкості спрямований усередину й угору від колового руху проти годинникової стрілки. У цьому випадку забруднюючі речовини з нижніх шарів атмосфери пересуваються до гори й розсіваються у великих об'ємах повітря. Під час руху повітря навколо центру низького тиску у північній півкулі в напрямку проти годинникової стрілки формується **циклон**.

#### 4. Сили тертя, що уповільнюють рух повітря поблизу земної поверхні.

Атмосфера виконує наступні функції:

- містить кисень, необхідний для дихання живих організмів;
- є джерелом вуглекислого газу для фотосинтезу рослин;
- захищає живі організми від космічних випромінювань;
- зберігає тепло Землі й регулює клімат;
- трансформує газоподібні продукти обміну речовин;
- переносить водні пари по планеті;
- є місцем існування форм організмів, що літають;
- служить джерелом хімічної сировини й енергії;
- приймає та трансформує газоподібні та пилоподібні відходи.

### **1.2. Природні ресурси атмосфери**

Атмосфера становить джерелом отримання таких промислових газів, як  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $Ar$ ,  $CO_2$  ( $t_{кип.}$ ,  $^{\circ}C$  відповідно:  $-183, -186, -169, -78,5$  (сухий лід)).

Основними споживачами кисню є:

1. Процеси штучного та природного згоряння;
2. Дихання живих організмів.

Основне джерело кисню – реакція фотосинтезу – відновлення  $CO_2$  світлочутливою речовиною (хлорофілом) під дією сонячного світла.

Механізм фотосинтезу через складнощі природи багатьох проміжних реакцій повністю не з'ясований. Проте відомо, що реакція посилюється за збільшення парціального тиску вуглекислого газу ( $P_{CO_2}$ ) та зменшенні парціального тиску кисню ( $P_{O_2}$ ). Швидкість реакції фотосинтезу залежить від інтенсивності світла й температури.

У темряві швидкість реакції фотосинтезу дорівнює нулю. Зі збільшенням інтенсивності світла, швидкість реакції спочатку зростає лінійно, а потім за асимптотою прагне максимального значення  $R_{max}$ . Положення  $R_{max}$  залежить від  $P_{CO_2}$  і  $P_{O_2}$ .



Установлено, що у процесі фотосинтезу бере участь  $22,5 \times 10^{10}$  т органічної речовини на рік, при чому 50% цієї речовини належить планктонів океанів. У океані відбуваються дві конкуруючі реакції - дихання (на глибині) і фотосинтез (на поверхні). Рівноважна крапка розташована на глибині до 160 м у чистій воді та 1–2 см – у каламутній воді.

Вироблення фітопланктоном кисню знижується зі зменшенням кількості світла, що потрапляє на океан. Це зменшення – наслідок розсіювання світла атмосферним пилом і димом, а також пролітої на водну поверхню нафти.

Збільшення виділення  $\text{CO}_2$  і підвищення температури навпаки сприяє прискоренню реакцій фотосинтезу.

Найбільшу загрозу процесу вироблення  $\text{O}_2$  становить утворення газонепроникного шару між джерелом фотосинтезу й атмосферою. Газонепроникний шар може виникнути через розлив нафтопродуктів. Він пригнічує фотосинтез, оскільки утворена плівка перешкоджає надходженню  $\text{CO}_2$  з повітря до води та виходу з води кисню, що утворюється. Це явище може спричинювати гіпотетичні проблеми, із якими людство сткнеться в майбутньому. Сьогодні немає безпосередніх ознак серйозного порушення циклу фотосинтезу.

Розрахунки показують, що порівняно з кількістю вуглецю в органічній матерії і викопному паливі запаси кисню великі.

На  $1 \text{ м}^2$  земної поверхні доводиться 60000 моль кисню при загальній його витраті 8 моль/ $1 \text{ м}^2$  на рік. На окислення 200 моль вуглецю, що міститься в кожному  $\text{ м}^2$  земної поверхні у вигляді живої тканини й гумусу, витрачається лише 1% запасів атмосферного кисню.

Якщо людина спалить усі відомі запаси викопного палива, то використає лише 3% наявного кисню.

У той же час (за оптимальних умов) 1 л хлорели може забезпечити 560 л кисню - необхідна кількість для денного дихання людини.

## 2. Загальна характеристика джерел і рівня забруднення атмосфери

Забруднення атмосфери – зміна складу атмосфери в результаті потрапляння до неї домішків.

*Домішок* атмосфери – це розсіяна в атмосфері речовина, що не міститься у її постійному складі.

*Забруднююча речовина* – це домішок в атмосфері, що несприятливо впливає на навколишнє середовище та здоров'я населення.

Оскільки домішки атмосфери можуть зазнавати різних перетворень, їх можна умовно поділити на первинні й вторинні.

*Первинний домішок* в атмосфері – домішок, що зберег за даний інтервал часу свої фізичні та хімічні властивості.

*Вторинний домішок* в атмосфері – це домішок атмосфери, що утворився внаслідок перетворення первинних домішків.

*Перетворення домішків* в атмосфері – процес, за якого домішки атмосфери піддаються фізичним і хімічним змінам під впливом природних і антропогенних чинників, а також унаслідок взаємодії між собою.

Для *кількісної оцінки* змісту домішків в атмосфері використовують поняття їхньої *концентрації* – кількості речовини, що міститься в одиниці маси або об'єму повітря, приведеного до нормальних умов.

У різних точках урбанізованого простору концентрації домішків в атмосфері можуть істотно різнитися. Для опису цього явища використовують поняття *поле концентрації домішок* в атмосфері – графічне зображення просторової мінливості концентрації домішок в атмосфері, віднесене до устанавленого часу осереднення.

Забруднюючі речовини викидаються до атмосфери як суміш пилу, диму, туману, пари та газоподібних речовин.

## 2.1. Класифікація джерел забруднення атмосфери

Джерела домішок бувають природними, зумовленими природними процесами й антропогенними, зумовленими діяльністю людини.

До природних джерел забруднення атмосферного повітря відносять запошені бурі, масиви зелених насаджень у період цвітіння, степові й лісові пожежі, виверження вулканів. Домішки, що виділяються природними джерелами:

- пи́л рослинного, вулканічного, космічного походження, продукти ерозії ґрунту, частинки морської солі;
- тумани, дим і гази від лісових і степових пожеж;
- гази вулканічного походження;
- продукти рослинного, тваринного, бактеріального походження.

Природні джерела зазвичай бувають площадковими (розподіленими) та діють порівняно короткочасно. Рівень забруднення атмосфери природними джерелами є фоновим і мало змінюється з часом.

Антропогенні (техногенні) джерела забруднення атмосферного повітря, представлені переважно викидами промислових підприємств і автотранспорту, відрізняються чисельністю й різноманіттям видів (рис. 2.1).

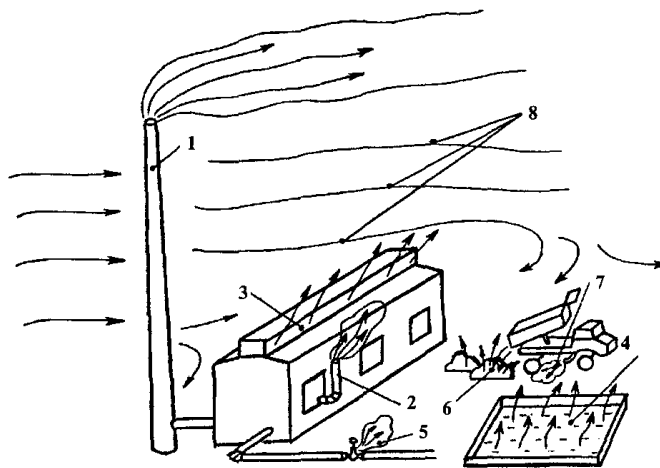


Рис.2.1 – Джерела забруднення атмосфери:

- 1 - високий димар; 2 - низький димар; 3 - аераційний ліхтар цеху; 4- випаровування з поверхні басейну; 5 - витік через нещільність устаткування; 6-пиління при розвантаженні сипучих матеріалів; 7- вихлопна труба автомобіля;  
8 - напрямок руху потоків повітря

Джерела викидів промислових підприємств бувають стаціонарними (джерела 1 – 6), за яких координата джерела викиду не змінюється в часі, і пересувними (нестаціонарними) (джерело 7 – автотранспорт).

Джерела викидів до атмосфери поділяють на: точкові, лінійні і площадкові. Кожен з них може бути затінений і незатінений.

*Точкові джерела* (на рис. 3 – 1, 2, 5, 7) – це забруднення, зосереджені в одному місці, координата яких має координату точки. До них відносяться димарі, вентиляційні шахти, кришні вентилятори.

*Лінійні джерела* (3) мають значну протяжність. Це аераційні ліхтарі, низки відкритих вікон, близькорозташовані кришні вентилятори. До них можуть також відноситися автотраси.

*Площадкові джерела* (4, 6). Забруднення, що видаляються з цих джерел, розосереджені по площині промислового майданчику підприємства. До площадкових джерел належать місця складування виробничих і побутових відходів, автостоянки, склади паливно-мастильних, сипучих матеріалів.

Незатінені (1), або високі джерела розташовані в недеформованому потоці вітру. Це димарі й інші джерела, що викидають забруднення на висоту, що перевищує 2,5 висот розташованих поблизу будівель та інших перешкод.

Затінені джерела (2 – 7) розташовані в зоні підпору або аеродинамічної тіні будівлі або іншої перешкоди.

Джерела викидів забруднюючих речовин до атмосфери поділяють на *організовані й неорганізовані*.

Із організованого джерела (1, 2, 7) забруднюючі речовини потрапляють до атмосфери через спеціально споруджені газоходи, воздуховоди та труби.

Неорганізоване джерело виділення забруднюючих речовин (5, 6) утворюється унаслідок порушення герметичності устаткування, відсутності або незадовільної роботи устаткування з відсмоктування пилу і газів, у місцях завантаження, розвантаження або зберігання продукту. До неорганізованих джерел належать автостоянки, склади паливно-мастильних або сипучих матеріалів та інші площадкові джерела.

### 3. Фізичні та хімічні забруднювачі атмосфери

#### 3.1. Фізичні забруднювачі атмосфери

Організм людини у процесі життєдіяльності піддається дії шкідливих хімічних і фізичних впливів.

До шкідливих фізичних дій (фізичне забруднення) належать забруднення, пов'язане із зміною фізичних параметрів середовища -радіаційних, шумових, світлових, температурних, електромагнітних тощо.

**Іонізуючі випромінювання** - радіаційні дії високого рівня енергії (потoki  $\alpha$ -,  $\beta$ - і  $\gamma$ -часток, що утворюються при радіоактивному розпаді або у прискорювачах), електромагнітні випромінювання довжиною хвилі менш  $10^{-7}$  см.

*Іонізуючі випромінювання* характеризуються високим ступенем біологічної дії на рівні молекул і клітин, окремих органів та організму в цілому. При цьому відбувається поглинання біосубстратом енергії випромінювання, іонізація атомів і молекул, пошкодження молекулярних сполук і утворення активних вільних радикалів.

**Неіонізуючі випромінювання** – частина електромагнітного спектру довжиною хвилі більше  $10^{-7}$  см у діапазоні від низьких до лазерних частот, невеликі дози радіоактивного випромінювання.

*Неіонізуючі випромінювання* не мають такої швидкої руйнівної дії на живі організми як іонізуюче випромінювання, проте віддалені наслідки його дії часто виявляються достатньо небезпечними.

**Акустичні дії** – шум, ультразвук, інфразвук і вібрація.

*Акустична дія* – шум є безладними коливаннями складної спектральної структури. Інтенсивність і спектральний склад шуму визначають ступінь дії на організм в цілому.

Акустичні коливання залежно від частоти поділяються на ультразвук (із частотою більше 20 000 Гц), звук, що сприймається органами слуху людини (від 16 до 20000 Гц) й інфразвук (частота менше 16 – 25 Гц).

Сильний шум негативно впливає на органи слуху людини, погіршується сприйняття звуків. Його постійна дія знижує працездатність і є причиною неврозів і багатьох інших захворювань.

*Вібрація й інфразвук* негативно впливають на стан людей, викликаючи відчуття прискороного коливання внутрішніх органів і больові відчуття, синдром морської хвороби, а також відчуття тривоги, страху, утрудняють і погіршують інтелектуальну діяльність. Джерелами інфразвукових коливань і пов'язаних з ними вібрацій є компресорні станції, вентилятори, кондиціонери, градирні, турбіни дизельних електростанцій і так далі.

### **3.2. Хімічні забруднювачі атмосфери**

Хімічне забруднення повітря – це викиди до атмосфери хімічних елементів та їхніх сполук. Ці викиди характеризуються за 4-ма наступним ознакам:

1. За агрегатним станом: газоподібні, рідкі та тверді.
2. За хімічним складом:
  - сірчастий ангідрид;
  - оксид вуглецю;
  - оксиди азоту;
  - тощо.

Перелік речовин, для яких встановлено рівні ГДК та ОБРВ включає більше 2000 найменувань.

3. За розміром часток:
  - менше 0,5 мкм;
  - від 0,5 до 3 мкм;
  - від 3 до 10 мкм;
  - від 10 до 50 мкм;
  - від 50 мкм і більше.
4. За масою речовини, що викидається:
  - менше 1 кг/годину;
  - від 1 до 10 кг/годину;

- від 10 до 100 кг/годину;
- від 100 до 1000 кг/годину;
- від 1000 до 10000 кг/годину;
- від 10000 кг/годину і більше.

Найбільш поширеними забруднюючими речовинами, що поступають в атмосферне повітря від техногенних джерел є:

1. оксид вуглецю – CO;
2. діоксид сірки – SO<sub>2</sub>;
3. оксиди азоту – NO<sub>x</sub>;
4. вуглеводні – C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>
5. пил.

Зі всієї маси забруднюючих шкідливих речовин, що потрапляють до атмосфери від антропогенних джерел, близько 90% складають газоподібні, 10% – тверді та рідкі речовини.

Найчистіше повітря на землі – над океаном. Рівень забруднення перевищує цей показник:

- у 10 разів – у сільській місцевості;
- у 35 разів – над селищами та малими містами;
- у 150 разів – над великими промисловими центрами.

Перевищення концентрації забруднюючих речовин над фоновими може досягати:

- для CO від 80 до 1250 разів;
- для SO<sub>2</sub> від 50 до 300 разів;
- для NO<sub>x</sub> до 25 разів;
- для O<sub>3</sub> до 7 разів.

Середні щорічні викиди домішків в атмосферу (млн.т/рік) від антропогенних і природних джерел представлені в таблиці.

Таблиця 3.1. – Середні щорічні викиди домішків в атмосферу

<b>Речовина</b>	<b>Природні джерла</b>	<b>Антропогенні джерела</b>	<b>% антропогенного викиду</b>
Пил	3700	1000	27
CO	5000	304	5,7
C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	2600	88	3,3
NO <sub>x</sub>	770	53	6,5
SO <sub>2</sub>	650	100	13,3
CO <sub>2</sub>	485	18,3	3,6



## 4. Характеристика й основні властивості домішок атмосфери

### 4.1. Оксид вуглецю (CO)

Оксид вуглецю (CO) – (337-5/3-4)<sup>1</sup> – найпоширеніший і найбільш значний домішок атмосфери, який у побуті називають чадним газом. Уміст CO у природних умовах складає від 0,01 до 0,2 мг/м<sup>3</sup>.

Основна маса викидів CO утворюється унаслідок спалювання органічного палива, перш за все, у двигунах внутрішнього згоряння. Зміст CO в повітрі великих міст коливається в межах 1÷250 мг/м<sup>3</sup> за середнього значення 20 мг/м<sup>3</sup>. Найбільш висока концентрація CO спостерігається на вулицях і площах міст із інтенсивним рухом, особливо біля перехресть.

Висока концентрація CO в повітрі призводить до фізіологічних змін в організмі людини, а концентрація більше 750 мг/м<sup>3</sup> – до загибелі. CO – виключно агресивний газ, що легко поєднується з гемоглобіном крові, утворюючи *карбоксигемоглобін*. Стан організму під час дихання повітрям, що містить чадний газ, характеризується даними, наведеними в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. – Дія чадного газу на організм людини

Зміст карбоксигемоглобіну, %	Симптоми
0,4 - 2 2 - 5 5 - 10 10 - 80	1. Погіршення гостроти зору та здатності оцінювати тривалість інтервалів часу 2. Порушення психомоторних функцій головного мозку 3. Зміна діяльності серця та легенів 4. Головний біль, сонливість, спазми, порушення дихання, смертельні випадки.

Ступінь дії CO на організм людини залежить також від тривалості дії (експозиції) і виду діяльності людини. Наприклад, за вмісту CO в повітрі 10÷50 мг/м<sup>3</sup>, що спостерігається на перехрестях вулиць великих міст, за експозиції 60 хвилин фіксуються порушення, наведені у п.1, а за експозиції від 12 годин до 6 тижнів – у п.2. Під час важкої фізичної роботи отруєння настає у 2–3 рази швидше. Утворення карбоксигемоглобіну – процес, що можна повернути назад,

<sup>1</sup> 337- код речовини

5/3-4 це означає : ГДК<sub>мр</sub>=5мг/м<sup>3</sup>; ГДК<sub>сд</sub>=3мг/м<sup>3</sup>; клас небезпеки – 4.

через 3-4 години вміст його у крові зменшується у 2 рази. Час перебування СО в атмосфері складає 2 – 4 місяці.

#### 4.2. Діоксид сірки (SO<sub>2</sub>)

Діоксид сірки (SO<sub>2</sub>) – (330-0,5/0,05-3)– безбарвний газ із гострим запахом. На його частку доводиться до 95% загального об'єму сірчистих сполук, що надходять до атмосфери з антропогенних джерел. До 70% викидів SO<sub>2</sub> утворюються при спалюванні вугілля, близько 15% – при спалюванні мазуту.

За концентрації SO<sub>2</sub> 20–30 мг/м<sup>3</sup> роздратовується слизова оболонка рота й очей, у роті виникає неприємний присмак. Вельмичутливі до SO<sub>2</sub> хвойні ліси. За концентрації SO<sub>2</sub> у повітрі 0,23 – 0,32 мг/м<sup>3</sup> в результаті порушення фотосинтезу відбувається усихання хвої протягом 2 – 3 років. Аналогічні зміни у листяних деревах відбуваються за концентрацій SO<sub>2</sub> 0,5 – 1 мг/м<sup>3</sup>.

#### 4.3. Вуглеводні (C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>)

Вуглеводні (C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>, m=C<sub>12</sub>-C<sub>19</sub>) – (2754-1/--4) Основне техногенне джерело викидів вуглеводнів (C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>) – пари бензину, метан, пентан, гексан) - автотранспорт. Його питома вага складає більше 50% загального об'єму викидів. За неповного згоряння палива відбувається також викид циклічних вуглеводнів, що мають канцерогенні властивості. Особливо багато канцерогенних речовин міститься в сажі, що викидається дизельними двигунами.

Із вуглеводнів в атмосферному повітрі найчастіше зустрічається метан, що є наслідком його низької реакційної здатності. Вуглеводні володіють наркотичною дією, викликають головний біль, запаморочення. При вдиханні протягом 8 годин парів бензину з концентрацією більше 600 мг/м<sup>3</sup>, виникають головний біль, кашель, неприємне відчуття в горлі.

#### 4.4. Оксиди азоту (NO<sub>x</sub>)

Оксиди азоту (NO, NO<sub>2</sub>) утворюються під час горіння за високої температури унаслідок окислення частини азоту, що знаходиться в атмосферному повітрі. Під загальною формулою NO<sub>x</sub> зазвичай мають на увазі суму NO і NO<sub>2</sub>. Ос-

новні джерела викидів NOx: двигуни внутрішнього згорання, топки промислових казанів, печі.

**NO<sub>2</sub>** – (301-0,085/0,04-2) газ жовтого кольору, що надає повітрю в містах коричневого відтінку. Отруйна дія NO<sub>2</sub> починається з легкого кашлю. За підвищення концентрації, кашель посилюється, починається головний біль, виникає нудота. При контакті з водною парою на поверхні слизової оболонки утворюються кислоти HNO<sub>3</sub> і HNO<sub>2</sub>, що можуть призвести до набряку легенів. Тривалість знаходження NO<sub>2</sub> в атмосфері – близько трьох діб.

**NO** – (304-0,4/0,06-3) безбарвний газ, без запаху, без смаку, негорючий, що погано розчиняється у воді. На повітрі **NO** окислюється до **NO<sub>2</sub>**.

#### 4.5. Аерозолі

Зважені речовини утворюють двофазну (бінарну) полідисперсну систему, яка отримала назву **аерозолі**. Загальна кількість різновидів аерозолів, що забруднюють атмосферу, складає декілька сотень.

Аерозолі прийнято поділяти на три класи: **пил, дими й тумани**.

**Пил** – полідисперсні системи твердих зважених часток розміром від 5 до 100 мкм. Іноді пилом називають безпосередньо тверді зважені частки.

**Дими** – аерозолі, що утворюються під час горіння або сублімації, містяться у викидах електropечей, вагранок, ділянок електрозварювання. Розміри зважених часток від 0,1 до 5 мкм.

**Тумани** складаються з крапельок рідини, що диспергують у газовому середовищі. У краплях можуть міститися розчинені речовини або суспензовані тверді частки. Утворюються унаслідок *конденсації* пари або *розпилювання* рідини. У першому випадку розмір крапель близький до розміру часток у димах, у другому – до пилу. Утворюються при забарвленні, при гарті виробів у маслі.

Особливе місце займають продукти згорання палива: сажа і зола.

**Сажа** – токсичний високодисперсний порошок, який на 90–95% складається з часток вуглецю. Утворюється під час неповного згорання або термічного розкладання вуглеводнів. Має велику адсорбційну здатність стосовно до ва-

жких вуглеводнів, зокрема до бенз(а)пірену, що робить сажу небезпечною для людини:  $\text{ГДК}_{\text{м.р.}} = 0,15 \text{ мг/м}^3$ ,  $\text{ГДК}_{\text{с.д.}} = 0,05 \text{ мг/м}^3$ .

**Зола** – залишок, що не згоряє, утворюється з мінеральних домішків палива за його повного згорання. Склад золи багато в чому визначається видом і складом палива.

Уплив зважених речовин на людину й навколишнє середовище визначається їхнім складом і властивостями.

Особливу небезпеку для здоров'я людини становить токсичний тонкодисперсний пил із розміром часток 0,5–10 мкм, які легко проникають до органів дихання.

Середній розмір часток пилу в атмосферному повітрі – 7 – 8 мкм. Пил шкідливо діє на людину, рослинний і тваринний світ, поглинає сонячну радіацію, і таким чином впливає на термічний режим атмосфери та земної поверхні. Частинки пилу служать ядрами конденсації під час утворення хмар і туманів. Основна маса пилу вимивається з атмосфери осіданнями.

Основні антропогенні джерела пилу:

- промисловість видобуток і переробка будматеріалів (виробництво цементу, дроблення щебню, тощо);
- сталеливарна промисловість (бурий дим – оксиди заліза);
- кольорова металургія (частинки Al, Cu, Zn .);
- автотранспорт, спалювання відходів, палива (сажа, зола).

Зразковий склад пилу повітря великих промислових центрів:

- 20% – оксиди заліза;
- 15% – силікати;
- 5% – сажа;
- інше - оксиди металів: As, Mo, Sb, тощо.

Орієнтовні значення умісту пилу в повітрі,  $\text{мг/м}^3$  (середньодобові):

- сільське повітря – 0,02;
- повітря міст – 0,1–0,4;
- у промислових районах (максимальні значення) - до 15;
- магазини – 5–8;

- ливарні цехи – 15–50;
- вугільні шахти – 100–200;
- ділянка упаковки цементу в мішки – 100–500.

#### 4.6. Діоксид вуглецю ( $CO_2$ )

Діоксид вуглецю ( $CO_2$ ) або вуглекислий газ не є домішкою в атмосфері, оскільки входить до її постійного складу (0,03%). Природні шляхи попадання його до атмосфери – дихання й розпад організмів, рослин і гумусу. Антропогенні – спалювання речовин, що містять вуглеводні сполуки.

$CO_2$  міститься в атмосфері в такій кількості, що грає роль в тепловому балансі Землі як за поглинання, так і за випромінювання інфрачервоної радіації. Збільшення вмісту  $CO_2$  в атмосфері призводить до збільшення температури поверхні Землі (парниковий ефект).  $CO_2$  не токсичний на рівнях, передбачених на кінець сторіччя і навіть за вищих концентрацій.

ПАРНИКОВИЙ ЕФЕКТ атмосфери – уластивість атмосфери пропускати сонячну радіацію, але затримувати земне випромінювання, сприяє акумуляції тепла Землею.

Земна атмосфера порівняно добре пропускає сонячну короткохвильову радіацію, яка майже повністю поглинається земною поверхнею, оскільки альbedo<sup>2</sup> земної поверхні мале. Нагріваючись унаслідок поглинання сонячної радіації, земна поверхня стає джерелом земного, в основному довгохвильового, випромінювання, прозорість атмосфери для якого мала і яке майже повністю поглинається в атмосфері. Завдяки парниковому ефекту за ясного неба тільки 10–20% земного випромінювання може, проникаючи крізь атмосферу, іти до космічного простору.

---

<sup>2</sup> АЛЬБЕДО - характеристика відбивних властивостей поверхні тіл: відношення розсіяного потоку випромінювання поверхні до потоку випромінювання, який падає на поверхню.

## 5. Хімічні перетворення (трансформація) домішків в атмосфері

Тропосфера є нерівноважною хімічно активною системою. Тут безперервно відбуваються процеси зміни концентрації домішків в атмосферному повітрі.

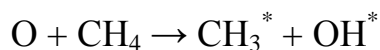
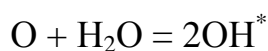
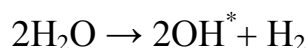
Знання про механізми та швидкість процесів надходження викидів із природних та антропогенних джерел, перенесення до інших сфер (воду, ґрунту) або трансформації в атмосфері дозволяють скласти баланс атмосферної частини глобального колообігу речовин у природі.

Більшість газоподібних домішок, що викидаються до атмосфери, мають відновлену форму або у вигляді оксидів із низьким ступенем окислення (сірководень, метан, оксид азоту). Аналіз атмосферних опадів показує, що домішки, які повернулися на поверхню землі представлені здебільшого сполуками високого ступеню окислення (сірчана кислота, сульфати, азотна кислота, нітрати, діоксид вуглецю). Таким чином, *тропосфера грає роль глобального окислювального резервуару.*

Процеси окислення домішків у тропосфері можуть протікати за трьома різними напрямками:

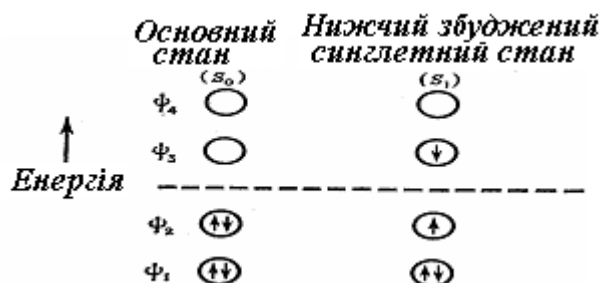
1. Окислення безпосередньо в газовій фазі.
2. Окисленню передуює абсорбція домішків частинками води, надалі процес окислення відбувається в розчині.
3. Окисленню передуює адсорбція домішків на поверхні зважених у повітрі часток.

У ролі окислювача можуть виступати *молекули кисню, перекис водню, озон*. Провідну роль у процесах окислення, що протікають в атмосфері, грають *вільні радикали*, перш за все, *гідроксильний радикал OH*. Він утворюється у верхніх шарах атмосфери шляхом фотодиссоціації води та інших реакцій, що протікають за участю *синглетно-збудженого* атому кисню.



Згідно з експериментальними даними, концентрація гідроксильних радикалів у тропосфері складає  $(0,5 - 5) \times 10^6 \text{ 1/см}^3$ .

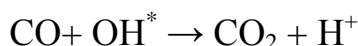
У основних станах звичайних молекул усі електрони спарені; у збудженому стані усі електрони також можуть бути спареними. Такі збуджені стани, за яких електрони спарені, називаються синглетними.



Схематичне зображення електронних конфігурацій основного і нижчого збудженого стану (синглетного) молекули з чотирма електронами і чотирма молекулярними орбіталями ( $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ )

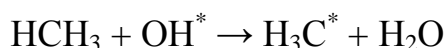
### 5.1. Трансформація сполук вуглецю

Здебільшого CO можна розглядати як хімічно неактивний компонент повітря. Проте, у стратосфері й за фотохімічного смогу, CO може окислюватися до CO<sub>2</sub>, узаємодіючи з вільним радикалом OH\*:

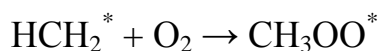


### 5.2. Трансформація метану

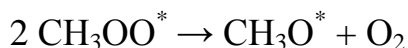
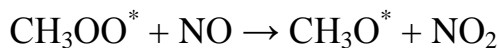
СН4 – Фотохімічне окислення метану в тропосфері відбувається здебільшого за радикальним механізмом:



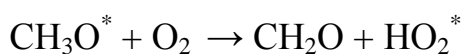
Метильний радикал, що утворився на першій стадії, при зіткненні з молекулою кисню, дає іншу нестійку частку – метилпероксидний радикал.



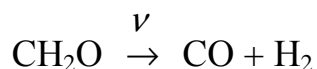
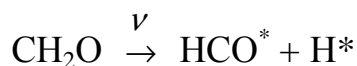
Метилпероксидний радикал в атмосфері розкладається й утворює менш токсильний радикал:



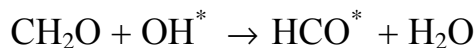
При взаємодії метоксильного радикалу з киснем відбувається утворення формальдегіду:



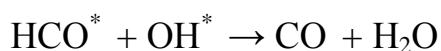
Молекули  $\text{CH}_2\text{O}$  піддаються фотолізу при поглинанні світла в найближчій ультрафіолетовій області з утворенням формільного радикалу:



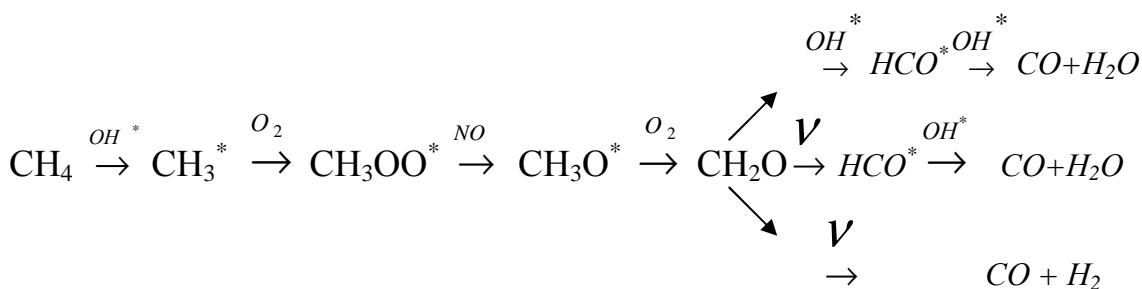
Формільний радикал  $\text{HCO}^*$  утворюється також під час взаємодії формальдегіду з гідроксилрадикалом:



Реагуючи с  $\text{OH}$ -радикалом, формільний радикал утворює оксид вуглецю, що становить остаточну стадію окислення органічних сполук в атмосфері:

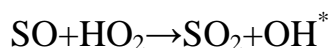
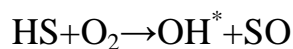
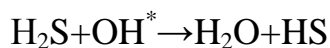


Ланцюжок перетворень метану в атмосфері може виглядати наступним чином:

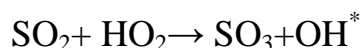
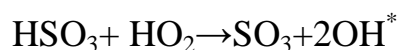
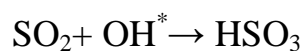


### 5.3. Трансформація сполук сірки

$\text{SO}_2$  – Детальний механізм трансформації сполук сірки у тропосфері до сьогодні не встановлено. Найбільш вірогідним уявляється протікання реакцій окислення за участю вільних радикалів:



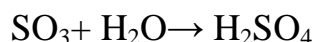
Отриманий із сірководня діоксид сірки (як і  $\text{SO}_2$ , що надходить із антропогенних джерел) окислюється далі:





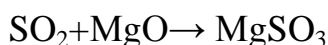
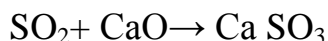
Швидкість трансформації діоксиду сірки за середніх значень концентрацій вільних радикалів у повітрі складає приблизно 0,1% на годину, що відповідає часу перебування SO<sub>2</sub> в атмосфері, що дорівнює 5 добам. Процес трансформації діоксиду сірки в повітрі різко прискорюється у промислових регіонах, де має місце збільшений уміст вільних радикалів.

Триоксид сірки (сірчаний ангідрид) легко взаємодіє з частками атмосферної вологи й утворює розчини сірчаної кислоти:



Реагуючи з аміаком або іонами металів, що наявні в частках атмосферної вологи, сірчана кислота частково переходить у відповідні сульфати. Здебільшого це сульфати амонію, натрію, кальцію.

Утворення сульфатів відбувається й у процесі окислення на поверхні твердих часток, зважених у повітрі. У цьому випадку стадії окислення передують адсорбція, що супроводжується хімічними реакціями з утворенням сульфатів:



Надалі за взаємодії з молекулярним киснем сульфати переходять у відповідні сульфати.

У дощову погоду можливий процес окислення SO<sub>2</sub> після попередньої адсорбції їх краплями атмосферної вологи. В процесі окислення SO<sub>2</sub> в рідкій фазі активну участь беруть іони OH<sup>-</sup> і HO<sub>2</sub><sup>-</sup>, які утворюються унаслідок фотохімічних перетворень у шарі хмар. Кінцевими продуктами окислення SO<sub>2</sub> як у розчині, так і в газовій фазі, є сірчана кислота, утворена у вигляді мелкодисперсних аерозолів. Аерозолі вимиваються з атмосфери осіданнями й адсорбуються на поверхні землі. Такі явища називаються кислотними дощами. Водневий показник (рН) води кислотних дощів менше 5,6.

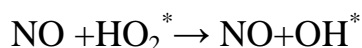
У перші моменти після викиду діоксиду сірки до атмосфери практично відсутні частки сірчаної кислоти й сульфатів. Із часом частка SO<sub>2</sub> у повітрі зменшується, одночасно зростає частка сірки у вигляді H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> і сульфатів. Кількість

сірчаної кислоти в атмосфері досягає максимуму через 10 годин після викиду, а сульфатів – через 30–40 годин.

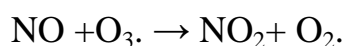
#### 5.4. Трансформація сполук азоту

Сполуки азоту в атмосфері здебільшого представлені оксидами азоту, аміаком і солями амонію, а також азотною кислотою й нітритом.

Більшість природних та антропогенних викидів містять оксид азоту NO. У тропосфері NO, узаємодіючи з гідропероксил-радикалом, переходить у діоксид азоту:



Окислення оксиду азоту відбувається також при взаємодії з озоном:



Під дією сонячного випромінювання відбувається зворотна реакція – частина діоксиду азоту розкладається з утворенням оксиду азоту й атому кисню:



Атомарний кисень утворює в атмосфері озон.

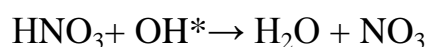
Унаслідок узаємодії діоксиду азоту з гідроксильним радикалом відбувається утворення азотної кислоти:



Утворення азотної кислоти за вищенаведеною реакцією є важливою частиною атмосферного циклу сполук азоту. Близько 44%  $\text{HNO}_3$  у тропосфері утворюється унаслідок саме цієї реакції.

Основна кількість азотної кислоти виводиться з тропосфери з атмосферними осіданнями у вигляді розчинів  $\text{HNO}_3$  та їхніх солей.

Частина азотної кислоти розкладається з утворенням діоксиду або триоксиду азоту, що знову уключаються до атмосферного циклу його сполук:



Серед нітратів, наявних в атмосфері, переважну більшість складає азотно-кислий амоній  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , який утворюється при взаємодії відповідних аерозолів

кислот та аміаку. Сполуки амонію виводяться з атмосфери з атмосферними опадами й унаслідок процесів сухого осадження.

Слід зазначити, що оксиди азоту поступають до атмосфери у формі NO, який на подальших стадіях перетворюється на NO<sub>2</sub>. Двоокис є токсичнішою сполукою: ГДК<sub>NO<sub>2</sub></sub>=0,2мг/м<sup>3</sup>; ГДК<sub>NO</sub>=0,4 мг/м<sup>3</sup>. Цю обставину необхідно врахувати під час розробки заходів щодо захисту атмосферного повітря та проведенні відповідного перерахунку.

Наприклад, оксиди азоту в димових газах, що потрапляють до атмосфери з продуктами згорання палива приблизно на 97% складаються з NO. В атмосферному повітрі близько 80% NO окислюється в NO<sub>2</sub>. Тому склад викидів необхідно привести у відповідність із обліком перетворення частини NO в NO<sub>2</sub>.

*Приклад: Від нагрівальної печі до атмосфери викидаються оксиди азоту NO<sub>x</sub> у кількості 100 г/с. Визначити кількість NO і NO<sub>2</sub>, що необхідно врахувати в атмосферному повітрі.*

**Рішення:**

1. Кількість NO<sub>2</sub>, NO що міститься в масі NO<sub>x</sub> димових газів:

$$M_{NO_2} = 100 * 0,03 = 3 \text{ г/с}$$

$$M_{NO} = 100 * 0,97 = 97 \text{ г/с.}$$

2. Маса NO<sub>2</sub>, що утворюється під час трансформації NO :

$$M_{NO_2} = M_{NO} * A * (M_{(NO_2)} / M_{(NO)}) = 97 * 0,8 * (46/30) = 119 \text{ г/с.}$$

де: a=0,8 – частка NO, що окислюється в атмосферному повітрі в NO<sub>2</sub>.

M<sub>(NO<sub>2</sub>)</sub>, M<sub>(NO)</sub> – молекулярна маса двоокису і окислу азоту (46 і 30).

3. Загальна кількість NO<sub>2</sub>, яку необхідно врахувати під час розрахунків забруднення атмосфери:

$$M_{NO_2} = 3 \text{ г/с} + 119 \text{ г/с} = 122 \text{ г/с.}$$

4. Загальна кількість NO, яку необхідно врахувати під час розрахунків забруднення атмосфери:

$$M_{NO} = M_{NO} * (1 - A) = 97 * (1 - 0,8) = 19,4 \text{ г/с.}$$

5. Загальна кількість NO<sub>x</sub> в атмосферному повітрі в результаті трансформації:

$$M_{NO_x} = M_{NO_2} + M_{NO} = 122 \text{ г/с} + 19,4 \text{ г/с} = 141,4 \text{ г/с.}$$

## **6. Смог і його види**

Трансформація домішок в атмосфері може призвести до утворення смогу.

Смог (від англійських слів smoke – дим, fog – туман) – атмосферне явище, що утворюється за певних метеорологічних умов і високого ступеню забрудненості повітряного басейну. Розрізняють наступні види смогів: фотохімічний, лондонський і крижаний.

### **6.1. Фотохімічний смог**

*Фотохімічний смог* утворюється в ясну сонячну погоду, за низької вологості, температури вище +30°C, повної відсутності вітру й високої забрудненості повітря. При фотохімічному смогу спостерігається поява голубуватої димки або білуватого туману й пов'язане з цим погіршення видимості. Хімічними сполуками, що забезпечують такі властивості смогу, є озонід вуглецю та пероксиацил-нітрати (ПАН), що утворюються унаслідок хімічних реакцій вуглеводнів, що перебувають у повітрі, із оксидами азоту та вуглецю під впливом сонячної радіації (фотохімічний ефект).

Смог викликає в людей роздратування органів слуху, хімічно діє як окислювач (підсилює корозію металів, призводить до розтріскування гуми) .

Фотохімічний смог характерний для таких міст, як Дніпропетровськ, Донецьк, Запоріжжя.

### **6.2. Лондонський смог**

*Лондонський смог* формується за вологості повітря близько 100%, температурі 0° С, тривалій штильовій погоді й високій концентрації продуктів згоряння твердого й рідкого палива (SO<sub>2</sub>, сажа, NO<sub>x</sub> і CO) . Спостерігається частіше в осінньо-зимовий період, характерний для помірних широт із вологим морським кліматом. Смог отримав свою назву після того, як у Великобританії відбулася у грудні 1952 р. катастрофічна ситуація, пов'язана з високою забрудненістю повітря та тривалим штилем протягом двох тижнів. У цей період різко підвищилася кількість легеневих і серцево-судинних захворювань,

смертність збільшилася більше, ніж у 10 разів. Подібні ситуації повторювалися у грудні 1956 та січні 1957 р. Завдяки прийнятим заходам із обмеження пилогазових викидів, забруднення атмосферного повітря в Лондоні значно знизилося. Так, у період 1952 – 1970 рр. викиди сажі під час опалювання житлових будинків скоротилися з 130 тис. т на рік до 10 тис. т, а від промислових підприємств з 50 тис. т до 5,0 тис. т в рік. Сильний туман, що утворився у грудні 1972 р. і висів над містом упродовж двох тижнів, цього разу не викликав серйозних наслідків для населення.

Смог типу лондонського характерний для Маріуполя, Одеси й інших приморських міст.

### **6.3. Крижаний смог**

*Крижаний смог* характерний для міст, розташованих у високих (північних) широтах. Він утворюється за температурах нижче – 30° С, повному штилі, високій вологості повітря й наявності потужних джерел забруднення атмосфери. За низької температури крапельки водяної пари перетворюються на кришталіки льоду (розміром 5 – 10 мкм) і зависають у повітрі у вигляді густого білого туману, видимість зменшується до 8 – 10 м. На кришталіках льоду адсорбуються частинки та молекули пилогазових викидів, унаслідок чого кришталіки льоду опускаються до приземного шару. Дихання в такому тумані унеможлиблюється.

Для України крижаний смог не характерний.

## **Змістовий модуль 1.2. Властивості пилу та газів.**

### **7. Основні фізико-хімічні властивості пилу та газів**

#### **7.1. Щільність пилу**

Щільність пилу (часток) – маса одиниці об'єму. Їснує істинна; така, що здається й насипна.

*Дійсна щільність* твердої частки визначається як відношення маси її речовини до займаного нею об'єму за вирахуванням об'єму пір і газових уключень, які може мати частинка.

*Щільність, що здається*, визначається як відношення маси частки до займаного нею об'єму, уключаючи об'єми пір і газових уключень.

Для монолітних твердих і рідких часток щільність, що здається, співпадає з істинною.

Відчутне зниження щільності, що здається, порівняно з істинною спостерігається у пилу, схильного до коагуляції, до спікання часток (сажа, оксиди кольорових металів тощо). Наприклад, дійсна щільність часток газової сажі складає  $1,8 - 1,9 \text{ г/см}^3$ , а що здається – близько  $0,13 \text{ г/см}^3$ .

Для розрахунків пиле- й золоулавлювачих апаратів використовують щільність, що здається, оскільки саме вона визначає поведінку часток у газових потоках.

*Насипна щільність* визначається відношенням маси свіжонасипаних твердих часток до об'єму, що вони займають; при цьому враховується наявність повітряних проміжків між частками.

Значення насипної щільності використовують для визначення об'єму бункерів газоочисних апаратів.

Зі збільшенням однорідності часток за розмірами їхня насипна щільність зменшується, оскільки збільшується відносний об'єм повітряних прошарків. Насипна щільність пилу, що злежався, виявляється у 1,2 – 1,5 разу більшою за свіжонасипану.

#### **7.2. Дисперсний склад пилу та способи його завдання**

Розміри часток золи та пилу характеризуються *дисперсним складом*.

Прийнято розрізняти:

1. Первинні розміри часток – характерні для моменту їхнього виникнення.

2. Розміри агрегованих часток – утворюються за коагуляції в пило-газових трактах.
3. Розміри часток після виділення їх із газової фази (пластівці, грудочки).

Для перших двох випадків використовують поняття «стоксівські розміри часток» – розміри сферичної частки щільністю  $1\text{г/см}^3$ , що має таку ж швидкість седиментації (осадження) в газовій фазі, як і дані несферичні частки або агрегати.

Фракція – відносна доля часток, розміри яких знаходяться в певному інтервалі значень, прийнятих як верхня й нижня межі.

Використовують три способи завдання дисперсного складу пилу:

- 1). Табличний;
- 2). Графічний;
- 3). Аналітичний.

#### 7.2.1. Табличний спосіб

Табличне уявлення. Дисперсний склад може подаватися у вигляді таблиці указівкою:

- а) фракцій, виражених у відсотках від загальної маси (Табл.7.1а);
- а) долі часток із розміром більше (дрібніше) наведеного (Табл.7.1б).

Таблиця 7.1а.

Дисперсний склад золи Донецького вугілля

Розмір частки, мкм	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	>50
Фракційний склад, %	12	20	30	12	8	5	13

Таблиця 7.1б.

Розмір частки, мкм	>5	>10	>20	>30	>40	>50
Доля часток з розмірами більше наведеного, %	88	68	38	26	18	13

#### 7.2.2. Графічний спосіб

Графічне уявлення. Дисперсний склад графічно може бути подаватися у вигляді:

- а) гістограми;
- б) диференціальної кривої;

с) інтегральної кривої.

Гістограму (ступінчатий графік) будують, беручи рівномірний розподіл часток за розмірах усередині кожної фракції. За віссю абсцис відкладають розмір часток фракції, за віссю ординат – відсоток умісту фракції.

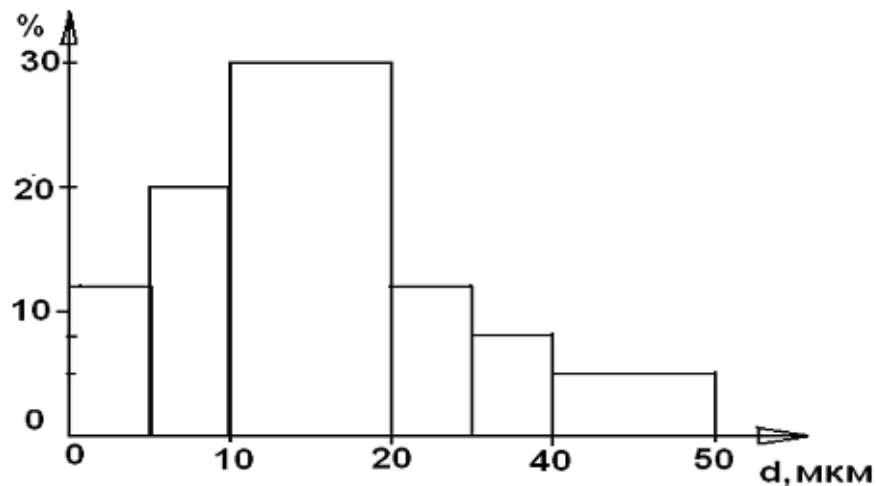


Рис.7.1. – Гістограма дисперсного складу золи Донецького вугілля

Диференціальна крива. Для побудови диференціальної кривої розподілу часток за розмірами необхідний:

- відсотковий уміст кожної фракції поділити на різницю граничних розмірів часток відповідної фракції;
- знайдені значення відкласти як ординати крапок, абсциси яких рівні середньому розмірові кожної фракції.

Таблиця 7.2. – Дані дисперсного складу для побудови диференціальної кривої

Розмір частки, мкм	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Фракційний склад, %	12	20	30	12	8	5
Ордината	$12/(5-0)=2,4$	$20/(10-5)=4$	$30/(20-10)=3$	$12/(30-20)=1,2$	$8/(40-30)=0,8$	$5/(50-40)=0,5$
Абсциса	$(0+5)/2=2,5$	$(10+5)/2=7,5$	$(10+20)/2=15$	$(20+30)/2=25$	$(30+40)/2=35$	$(40+50)/2=45$



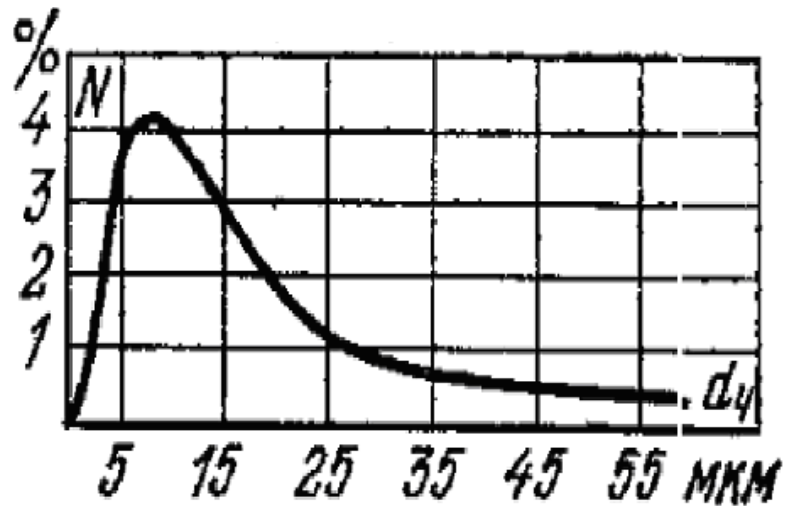


Рис.7.2. – Диференціальна крива розподілу часток за розмірами для золи Донецького вугілля

Інтегральна крива – найбільш зручна форма графічного відображення результатів дисперсного аналізу. Кожна точка кривої показує відносний уміст часток із розмірами більше  $R(dч)$  або менше  $D(dч)$  даного розміру. Крива  $R(dч)$  побудована за даними таблиці 7.1.b)

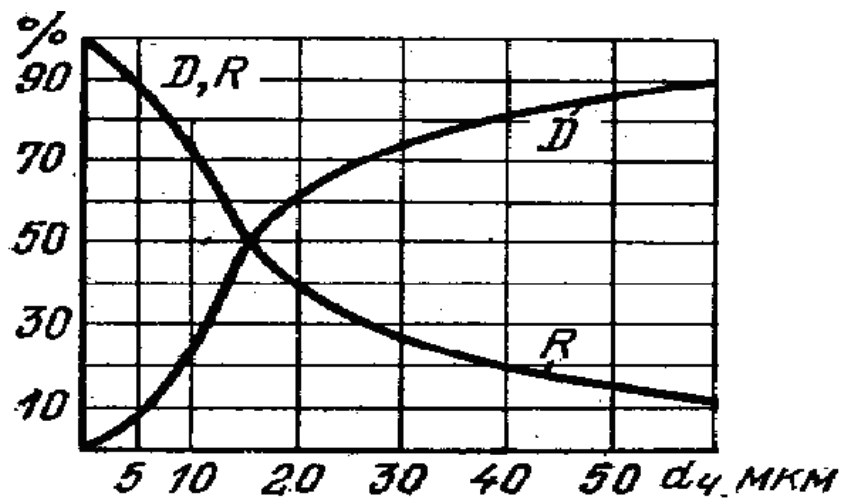


Рис.7.3. – Інтегральна крива розподілу часток за розмірами для золи Донецького вугілля

### 7.2.3. Аналітичний спосіб

Розподіл часток за розмірами в газових потоках із урахуванням їхньої агрегації в більшості випадків виявляється логарифмічно нормальним, навіть якщо розподіл первинних частинок не був таким.

Логарифмічно нормальний розподіл можна записати в наступному вигляді:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_u} e^{-\frac{\lg^2(d_u/d_m)}{2 \lg^2 \sigma_u}}$$

де  $\xi$  – питомий уміст часток із розмірами  $d_u$ ;

$d_m$  – медіанний розмір часток для даного розподілу (розмір, за якого кількість часток із розмірами  $> d_m$  дорівнює кількості часток із розмірами  $< d_m$ ;

$\sigma_u$  – середньоквадратичне відхилення у функції даного розподілу.

Інтегральна крива для часток із логарифмічно нормальним розподілом може бути записано у вигляді:

$$R(d_u) = \frac{100}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_u} \int_{+\infty}^{\lg d_u} e^{-\frac{\lg^2(d_u/d_m)}{2 \lg^2 \sigma_u}} d(\lg d_u)$$

Якщо зробити підстановку:

$$t = \frac{\lg(d_u/d_m)}{\lg \sigma_u},$$

то рівняння набуде вигляду:

$$R(d_u) = \frac{100}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_u} \int_{+\infty}^t e^{-t^2/2} dt,$$

де  $R(d_u)$  – відносний уміст часток із розмірами, більше, ніж  $d_u$ .

Для часток із логарифмічно нормальним розподілом інтегральні криві розподілу часток за розмірами зручно будувати в імовірнісно-логарифмічній системі координат, у якій криві набувають вигляду прямих ліній. Для побудови такої системи координат за віссю абсцис у логарифмічному масштабі відкладають значення  $d_u$ , а за віссю ординат – значення  $R(d_u)$  або  $D(d_u)$ .

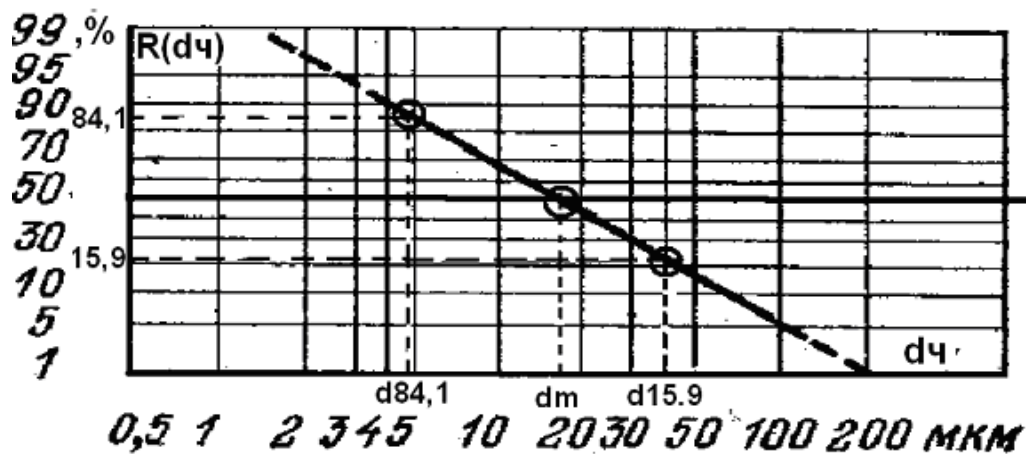


Рис.7.4. – Інтегральний розподіл часток за розмірами в імовірнісно-логарифмічній системі координат

В цьому випадку функцію розподілу часток за розмірами можна виразити у вигляді двох параметрів:  $d_m$  і  $\lg\sigma_{ch}$ .

Значенню  $d_m$  відповідає абсциса точки перетину отриманої прямої з лінією  $R(d_{ch})=50\%$ .

Значення  $\lg\sigma_{ch}$  знаходять із виразу, який є властивістю інтегралу вірогідності:

$$\lg\sigma_{ch} = \lg d_{15,9} - \lg d_m = \lg d_m - \lg d_{84,1},$$

де:  $\lg d_{84,1}$  і  $\lg d_{15,9}$  – абсциси крапок, ординати яких мають значення 84,1 і 15,9 відповідно.

При порушенні логарифмічно нормального розподілу, дисперсний склад в імовірнісно-логарифмічних координатах не буде виражений прямою лінією й не описуватиметь вищенаведеними рівняннями.

Для подібних випадків є низка більш загальних формул.

### 7.3. Аутогезійні властивості пилу

*Аутогезійні властивості* (аутогезія - зліпання) – характеризують зчеплення часток пилу одна з однією.

Одним із найбільш поширених порушень, збоїв у роботі пилогазоочисного обладнання є часткове або повне забивання апаратів або їхніх окремих елементів продуктом, який уловлюється. Тому зліпання є основним критерієм визначення галузі застосування того або іншого типу пилоуловлювача.

Золу та пил умовно поділяють на 4 групи за ступенем зліпання. В основі поділу лежить значення розривної міцності (сили зчеплення між частками), спеціально сформованих пилових шарів (прилад Андріанова):

1. Що не злипаються,  $P \leq 60\text{Па}$ ; (глиноземна, доломітова).
2. Що слабо злипаються,  $60 < P \leq 300\text{Па}$ ;
3. Що середнє злипаються,  $300 < P \leq 600\text{Па}$ ;

Що сильно злипаються  $P > 600\text{Па}$  (цементний пил із великим умістом вологи).

#### 7.4. Сипучість пилу

*Сипучість* пилу (тісно пов'язана з поняттям зліпання) є початковим параметром для визначення крутизни стінок бункерів пилогазоочисних апаратів і діаметрів випускних отворів.

*Сипучість* визначає *статичний* і *динамічний кут природного відкосу*.

*Статичний кут природного відкосу*  $\alpha_{ст}$  утворюється унаслідок обвалу шару часток під час видалення підпірної стінки. Визначається за допомогою приладу – скляна прямокутна ємність, одна із стінок якої знімається. У заповненій пилом ємності стінка віддаляється, частина пилу висипається. Пил, що залишився в ємності, має поверхню під певним кутом до горизонту. Цей кут є статичним кутом природного відкосу.

*Динамічний кут природного відкосу*  $\alpha_{дин}$  становить кут між горизонтальною площиною та конусом, отриманим при насипанні пилу на площину.

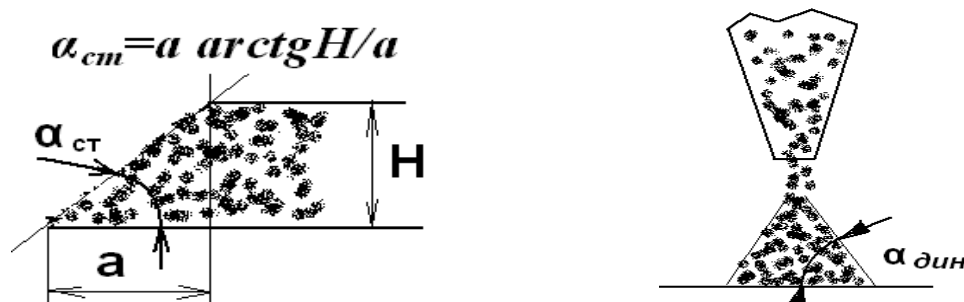


Рис.7.5. – Статичний і динамічний кут природного відкосу

#### 7.5. Абразивність пилу

*Абразивність пилу* – визначає знос унутрішніх поверхонь пилогазоочисних апаратів. Залежить від твердості, розміру, щільності та форми часток. Оцінюється за *коефіцієнтом абразивності* – визначається утратою ваги зразка, що стирається частками, зваженими в потоці повітря.

## 7.6. Електричні властивості пилу

*Питомий електричний опір* (ПЕО) [Ом\*м] шару пилу – омичний опір куба пилу із стороною, рівною 1м, проходженню електричного струму. ПЕО пилу впливає на ефективність роботи устаткування електричного очищення газів, залежить від фізико-хімічних властивостей пилу, температури, вологості.

*Електричний заряд часток (ЕЗЧ)* – характеризується ідеальним надмірним зарядом на одиницю маси пилу [Ку/г]. *ЕЗЧ* впливає на ефективність уловлювання частинок, аутогезійні властивості і вибухонебезпеку пилу. Частинки пилу можуть набувати заряду під час адсорбції іонів природного походження, тертя одного з одним або об стінки газоходів.

## 7.7. Змочуваність пилу

*Змочуваність пилу (ЗП)(%)* – характеризує її здатність змочуватися водою. Визначають шляхом вимірювання частки змоченого і такого, що занурився на дно судини порошку, насипаного тонким шаром на поверхню води (*метод плівкової флотації*). *ЗП* впливає на роботу мокрих пиловловлювачів. Під час зіткнення з поверхнею рідини, незмочувані частки залишаються на поверхні, а змочувані занурюються в рідину (гідрофобні та гідрофільні частки). Після заповнення поверхні рідини порошинками очищення газів погіршується, оскільки в результаті пружного зіткнення (з частками, що раніше осіли на поверхні рідини) частки пилу повертаються до потоку газу і виявляються невловленими.

По змочуваності пил поділяють на три групи:

1. Незмочувані – 0÷30%;
2. Середньо змочувані – 30÷80%;
3. Добре змочувані – 80÷100%.

Багато видів пилу через сильно розвинену поверхню часток мають здатність горіти, займатися й утворювати з повітрям пожежо- та вибухонебезпечні суміші. Подібні властивості спостерігають навіть у тому випадку, коли початковий матеріал, із якого отримано пил, є негорючим.

## 7.8. Пожежо- та вибухонебезпечні властивості пилу

Основними характеристиками пожежо- та вибухонебезпечних властивостей пилу є:

*Температура займання* – найменша температура горючої речовини, за якої швидкість виділення горючої пари забезпечує стійке горіння після займання від зовнішнього джерела.

*Температура самозаймання* – найменша температура (суміш пилу з повітрям) за якої відбувається різке збільшення швидкості екзотермічних реакцій, що призводить до виникнення полум'яного горіння.

Пил, зважений у повітрі, може запалати тільки за певних концентраціях.

*Діапазон займання* – діапазон концентрацій між верхньою та нижньою межами займання аеросупензій твердих речовин у повітрі.

Займання розрізняють за швидкістю розповсюдження фронту полум'я:

1. спокійне полум'я –  $W=4\div 10$  м/с;
2. Вибух –  $W>100$  м/с;
3. Детонація –  $W>1000$  м/с.

Вибух характеризується максимальним тиском ( $P_{\max}$ ), який виникає під час вибуху найбільш пожежо-, вибухонебезпечній суміші в замкненій ємності.  $P_{\max}$  використовують під час розрахунку устаткування на вибухостійкість. Вибух може бути *первинним і вторинним*.

*Первинний вибух* – при найбільших скупченнях пилу поблизу джерела займання.

*Вторинний вибух* – вибух пилу, піднятого в повітря первинним вибухом.

## 8. Властивості газів

Газами, що підлягають очищенню здебільшого, є повітря або димові гази.

Властивості газів характеризуються наступними параметрами:

- хімічний склад;
- температура;
- тиск;
- в'язкість;
- щільність;
- питома теплоємність;
- ентальпія;
- вологість;
- запиленість;
- витрата (масова або об'ємна).

Щільність, в'язкість, теплоємність, газова постійна й інші істотні показники для процесів пило- й золоуловлювання для повітря та для димових газів, мало відрізняються між собою. Тому, за відсутності даних для димових газів, значення перерахованих величин можуть прийматися за табличними даними для повітря.

### 8.1. Способи завдання компонентного складу газів

Хімічний склад. Компонентний склад суміші газів може задаватися масовими або об'ємними частками (або відсотками). Для визначення й перерахунку цих величин використовують наступні співвідношення:

$$g_i = \frac{G_i}{G_{см}} = \frac{V_i \rho_i}{V_{см} \rho_{см}} = r_i \frac{\rho_i}{\rho_{см}} = r_i \frac{M_i}{M_{см}}$$
$$r_i = \frac{V_i}{V_{см}} = \frac{\frac{G_i}{\rho_i}}{\frac{G_{см}}{\rho_{см}}} = \frac{G_i}{G_{см}} * \frac{\rho_{см}}{\rho_i} = g_i * \frac{\rho_{см}}{\rho_i} = g_i * \frac{M_{см}}{M_i}$$

де  $G_i$ ,  $V_i$ ,  $\rho_i$ ,  $M_i$  – маса, об'єм, щільність, молекулярна маса і-го компоненту газової суміші відповідно;

$G_{см}$ ,  $V_{см}$ ,  $\rho_{см}$ ,  $M_{см}$  – маса, об'єм, щільність, молекулярна маса газової суміші відповідно

$g_i$ ,  $r_i$  – масова і об'ємна частка і-го компоненту суміші відповідно.

## 8.2. Щільність, в'язкість і теплоємність суміші газів

Щільність( $\rho$ ), в'язкість( $\mu$ ) і теплоємність( $C$ ) суміші газів, що складається з  $n$  компонентів, концентрації яких відомі, знаходять за співвідношеннями:

$$\rho_{см} = r_1\rho_1 + r_2\rho_2 + \dots + r_n\rho_n, \text{ кг/м}^3$$

$$\mu_{см} = \rho_{см} \left( \frac{\mu_1}{r_1\rho_1} + \frac{\mu_2}{r_2\rho_2} + \dots + \frac{\mu_n}{r_n\rho_n} \right), \text{ Н*с/м}^2;$$

$$C_g = g_1C_1 + g_2C_2 + \dots + g_nC_n, \text{ Дж/кг } ^\circ\text{К} \text{ (завдання складу масовими частками);}$$

$$C_r = r_1C_1^I + r_2C_2^I + \dots + r_nC_n^I, \text{ Дж/м}^3 \text{ } ^\circ\text{К} \text{ (завдання складу об'ємними частками)}$$

Теплоємність (питома теплоємність) – кількість тепла, яка необхідна для нагрівання одиниці кількості речовини (1кг, 1м<sup>3</sup>, 1кмоль) на 1 °К.

Кількість газу може виражатися в кг, м<sup>3</sup>, моль. Відповідно, теплоємність буває:

1.  $C$  – масова, Дж/кг К;
2.  $C^I$  – об'ємна, Дж/м<sup>3</sup> К;
3.  $C^m$  – молярна Дж/кмоль К.

Розрізняють теплоємність при постійному тиску (ізобарна) –  $C_p$  та постійному об'ємі  $C_v$  (ізохорна).  $C_p > C_v$ .

Теплоємність реальних газів залежить від температури і тиску. На практиці, під час проведення розрахунків,  $C$  можна вважати постійною.

Щільність і в'язкість димових газів при спалюванні палив (з достатньою для практичних розрахунків точністю) можуть бути прийняті рівними щільності і в'язкості повітря при тих же значеннях температури і тиску.

Ентальпія( $i$ ) – кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання 1 кг речовини від 0°С до заданого значення при постійному тиску:

$$i = C_p t$$



Кількість тепла  $Q$ , що передається 1 кг газу при постійному тиску дорівнює різниці ентальпій початкового і кінцевого станів газу:

$$Q = i_2 - i_1$$

### 8.3. Вологість газів і способи її завдання. Зв'язок між параметрами вологого повітря, « $i-d$ » діаграма

Водяна пара практично завжди присутня в повітрі та димових газах. Вологість газів можна задати п'ятьма способами.

1. Концентрацією водяної пари, віднесеною до  $1\text{ м}^3$  газу:

$f$ ,  $\text{г/м}^3$  – сухий газ за нормальних умов:  $0^\circ\text{C}$ ,  $101,3$  кПа;

$f^I$ ,  $\text{г/см}^3$  – вологий газ за нормальних умов:  $0^\circ\text{C}$ ,  $101,3$  кПа;

$f^{II}$ ,  $\text{г/см}^3$  – вологий газ при фактичній температурі та тиску.

2. Парціальним тиском водяної пари ( $P_w$ )- добуток об'ємної частки пари ( $r$ ) на загальний тиск суміші ( $P$ ):

$$P_w = r * P$$

3. Об'ємним відсотком:

$$r_{\%} = \frac{P_w}{P} 100, \%$$

4. Абсолютною вологістю ( $d$ ) – кількістю водяної пари ( $G_{вп}$ ), віднесеної до одиниці маси сухого газу ( $G_{сг}$ ):

$$d = \frac{G_{вп}}{G_{сг}}, \text{ кг } \text{H}_2\text{O/кг сухого газу.}$$

5. Відносною вологістю ( $\varphi$ ) – ступінь наближення до насиченого стану за даних умов (відношення кількості водяної пари за даних умов до кількості водяної пари при насиченні для тих же умов).

$$\varphi = \frac{f^{II}}{f_{нас}^{II}} = \frac{f^I}{f_{нас}^I} = \frac{P_w}{P_{w...нас}}$$

Зв'язок між різними способами завдання вологості виражається наступними співвідношеннями:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f^I} - \frac{1}{804}; \quad f^I = 804 \frac{P_w}{P}; \quad f^{II} = \frac{0,36P}{(273+t) \left[ \left( \frac{1}{f} \right) + \left( \frac{1}{804} \right) \right]}$$

У розрахунках часто використовують поняття «Точка роси».

Точка роси – це температура, за якої газ перебуває у стані насичення парами води або іншої рідини й за якої починається випадання конденсату.

Найбільш поширеною рідиною, що конденсується, у димових газах є сірчана кислота. Кислота утворюється при спалюванні вугілля й інших сірковмісних палив в наслідок реакції оксидів сірки з парами води.

Якщо вологість газів задана, то їхня щільність може визначитися за формулами:

$$\rho_{овл} = \frac{\rho_{осух} + f}{1 + \frac{f}{0,804}}, \text{ кг/м}^3$$

де  $\rho_{осух}$  – щільність сухого газу за нормальних умов;

0,804 – щільність водяної пари за нормальних умов кг/м<sup>3</sup>.

Зв'язок між параметрами вологого повітря можна визначити за допомогою «*i-d*» діаграми (рис.7.6). Ця діаграма дозволяє швидко визначати параметри вологого повітря.

У «*i-d*»-діаграмі (рис.7.6) по вісі абсцис відкладається вологомiсткiсть *d* (г/кг сухого повітря), а за віссю ординат – ентальпія *i* (Кдж/кг) сухого повітря. Лінії *d=const* розташовуються вертикально, а лінії *i=const* – під кутом 45° (діаграма побудована в косокутній системі координат з кутом між вісями 135°).

Лініями  $\varphi=const$  є криві, що розходяться опуклістю до гори. Лінія насичення  $\varphi=100\%$ , що характеризує стан насиченого вологого повітря, поділяє діаграму на дві частини: вище за лінією розташована галузь ненасиченого вологого повітря, що є основною, робочою частиною діаграми, нижче – галузь пересиченого вологого повітря (тут надмірна волога перебуває у краплинному стані).

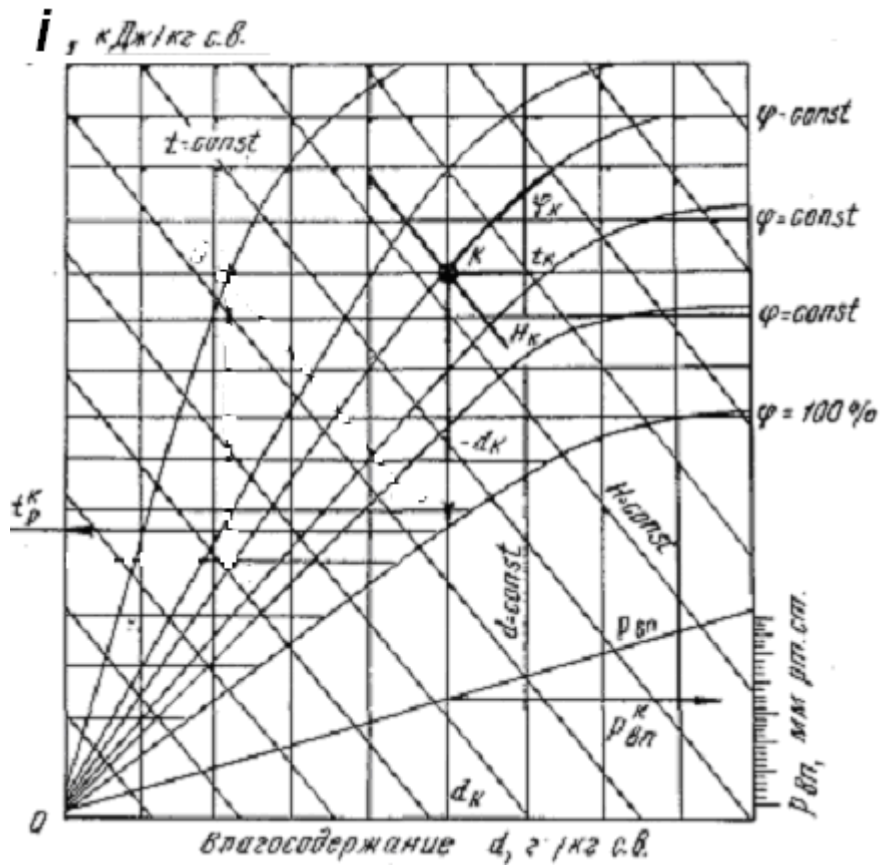


Рис.7.6. – «*i-d*»-діаграма вологого повітря

Будь-яка точка на діаграмі позначає певний фізичний стан вологого повітря.

Діаграма дозволяє за відомих температур ( $t_K$ ) та відносної вологості ( $\varphi_K$ ) знайти значення ентальпії ( $i_K$ ), вологовмісту ( $d_K$ ), парціального тиску водяної пари ( $p_{вп}^K$ ) і температуру «точки роси» ( $t_p^K$ ). Визначення цих величин для точки К показано на «*i-d*»-діаграмі (мал.7.6).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Экология города: Учебник/ Под ред. Ф. В. Стольберга. – К.: Либра, 2000. – 464с.
2. Справочник по пыле- и золоулавливанию./ М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков и др. Под общ. ред. А. А. Русанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312с.
3. Старк С. Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии. – М.: Металлургия, 1977.– 328с.
4. Алиев Г. М.– А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. Справочное издание. – М.: Металлургия, 1986. – 544с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

**БЕКЕТОВ** Володимир Єгорович,  
**ЄВТУХОВА** Галина Петрівна,  
**КОВАЛЕНКО** Юрій Леонідович

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ  
із курсу

**«ПРИКЛАДНА АЕРОЕКОЛОГІЯ»**

МОДУЛЬ 1  
**«Атмосфера. Основні терміни та визначення»**

(для студентів 2 курсу денної форми навчання за напрямом 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування»)

Редактор *К. В. Дюкар*

Комп'ютерне верстання *О. А. Балашова*

План 2010, поз. 47 Л

---

Підп. до друку 29.11.2010 р.

Формат 60×84/16

Друк на ризографі.

Ум.-друк. арк. 1,8

Зам. №

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4064 від 12.05.2011 р.