

Т. І. Русакова

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК
ДО ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ
«ТЕХНОЛОГІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО
ПРОГНОЗУВАННЯ»**



Міністерство освіти і науки України
Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара

Т. І. Русакова

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК
ДО ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ
«ТЕХНОЛОГІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО
ПРОГНОЗУВАННЯ»**

*Ухвалено на вченій раді
фізико-технічного факультету,
як навчальний посібник
протокол №19 від 17.10.2022 р.*

**Дніпро
2023**

Рецензенти: канд. техн. наук, доц. О.О. Борисовська, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», кафедра екології та технологій захисту навколишнього середовища;

канд. техн. наук, доц. О. Є. Золотько, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, доцент кафедри двигунобудування

М84 Навчальний посібник до вивчення дисципліни «Технології екологічного прогнозування». Дніпро: ПП Вахмістров О. Є., 2023. 124 с.

В посібнику запропоновано основний теоретичний матеріал стосовно факторів, що визначають характер міграції атмосферних забруднень, розглянуто основні закони руху повітряних мас, походження і класифікація забруднюючих речовин, основні джерела шкідливих викидів. Приділено увагу теоретичним основам розрахунку рівня забруднення атмосферного повітря та практичному дослідженню особливостей поширення забруднення від різних типів джерел шкідливих домішок. Запропоновано тестування для закріплення теоретичного матеріалу та завдання для самоконтролю практичної частини.

Призначено для студентів, що навчаються на першому освітньо-кваліфікаційному рівні бакалавра за освітньою програмою «Екоаналітика та техногенна безпека» спеціальності 183 Технології захисту навколишнього середовища. Може бути корисним для студентів інших освітніх програм даної спеціальності.

Вступ

«Технології екологічного прогнозування» – це дисципліна, яка входить до циклу професійної підготовки фахівців, що навчаються за освітньою програмою першого (бакалаврського) рівня вищої світи «Екоаналітика та техногенна безпека» спеціальності «Технології захисту навколишнього середовища». Екологічна ситуація у великих містах та індустріальних центрах України, а втім і в усьому світі, продовжує погіршуватися. При цьому найбільш помітну екологічну шкоду несе забруднене повітряне середовище міст. Тому як теоретичний аналіз, так і практичні рекомендації представляють безсумнівний інтерес.

Для екологічного прогнозування важливу роль відіграють метеорологічні фактори, що визначають характер міграції атмосферних забруднень. В посібнику розглянуто закони руху повітряних потоків, на основі яких і створюються математичні моделі для дослідження особливостей поширення забруднення. Наведено та проаналізовано різні вітрові системи, що формуються на різних територіях та впливають на зміну концентрації шкідливих домішок. Описані основні забруднюючі речовини, їх походження та класифікація, а також різні типи джерел шкідливих викидів. Розглянуто основи комбінованого забруднення повітряного середовища міст як антропогенними так і природними (біологічними) поллютантами. Відомо, що у міській атмосфері завжди знаходиться одночасно цілий комплекс шкідливих домішок, що надходять у середовище від різних джерел. В посібнику наведено теоретичні основи розрахунку рівня забруднення атмосфери та математичні моделі для практичного дослідження особливостей поширення забруднення від різних джерел в одновимірному наближенні, отримані на основі аналітичного розв'язання рівняння масопереносу домішки.

Запропонований посібник «Технології екологічного прогнозування» включає теоретичний матеріал лекційних занять, тестові завдання для кожної теми, які дозволяють закріпити теоретичні основи, практичні роботи для оволодіння технікою прогнозування поля концентрації шкідливих домішок в атмосферному повітрі від різних джерел забруднення. Практичні роботи включають, як теоретичний матеріал по аналітичному розв'язанню рівнянь переносу, так і рекомендації та вимоги до виконання завдань, приклади розподілу концентрації залежно від стану параметрів атмосфери. Практичні роботи також включають питання та завдання для самостійної роботи, оскільки частина самостійної роботи складає 60% часу, який відводиться на викладання дисципліни, а також самостійна робота студента оцінюється за певними критеріями, що наведено в робочій програмі дисципліни.

Також дані методичні вказівки будуть корисні для викладачів, оскільки можуть бути використані при проведенні усного опитування та при складанні форм опитування.

1. Метеорологічні фактори, що визначають характер міграції атмосферних забруднень

Мета: ознайомити з основами метеорологічними факторами, що впливають на поширення шкідливих домішок в атмосфері.

Метеорологічні фактори відіграють головну роль у поширенні шкідливих домішок в атмосфері. Слід зазначити, що метеоумови необхідно враховувати в процесі прямого аналізу та розрахунку шляху руху забруднень. Прогноз аномальних метеоситуацій важливий в більшій мірі, оскільки дозволяє передбачити появу критичних періодів на розглянутій території з погляду можливого перевищення порогового рівня концентрації шкідливих речовин.

Мета математичного моделювання в технологіях екологічного прогнозування – аналіз та прогноз якості повітря, поверхневих та підземних вод, з точки зору відповідності вмісту шкідливих речовин існуючим стандартам.

Напрями застосування:

1. Оцінка соціальної вартості (екологічної шкоди) внаслідок забруднення довкілля.
2. Обґрунтування природоохоронних заходів щодо запобігання або зниження рівня забруднення довкілля.

Математичні моделі – складова частина моніторингу навколишнього середовища, який включає систему спостереження, оцінки та прогнозу стану навколишнього середовища. Моніторинг може бути:

1. Біоекологічний (санітарно-гігієнічний);
2. Геоєкологічний (зміна природних екосистем під впливом техногенного, антропогенного навантаження);
3. Біосферний (зміна біосфери у глобальному масштабі).

Моніторинг ведеться:

1. У приземному та верхньому шарах атмосфери;
2. У гідросфері (поверхневі та підземні води);
3. У літосфері (грунти).

1.1 Поняття та види екологічного прогнозування

Екологічне прогнозування – це окремий вид діяльності, як функції управління, який полягає в отриманні науково обґрунтованих варіантів розвитку стану навколишнього середовища та здоров'я населення, природно-ресурсного потенціалу, ризиків виникнення надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру, індикаторів збалансованого розвитку.

Види екологічного прогнозування:

- глобальне прогнозування;
- державне прогнозування;
- регіональне і локальне прогнозування;

- проблемне і спеціальне прогнозування.

Глобальне прогнозування проводиться для Земної кулі в цілому, найвідомішими є, так звані, футуристичні прогнози людства.

Державне прогнозування проводиться спеціально уповноваженими державними органами разом з відповідними науковими установами, що забезпечують організацію короткострокового і довгострокового прогнозування змін навколишнього природного середовища.

Регіональне і локальне прогнозування здійснюється на місцевих рівнях, переважно на низовій адміністративно-територіальній ієрархії.

Проблемне і спеціальне прогнозування стосується досліджень територіально чи проблемно вузьких питань розвитку довкілля і охорони природи.

Прогнозування складається:

- з оцінки перспектив розвитку майбутнього стану прогнозованого явища на основі наявного досвіду;
- умовного тривання у майбутньому тенденцій і закономірностей, що довго тривали у минулому й існують у сучасному;
- моделювання майбутнього стану прогнозованого явища згідно з очікуваними або бажаними змінам.

Основними елементами екологічного прогнозування є:

- оцінка сучасного стану;
- зонування території (виділення ареалів з різними параметрами середовища і забруднення);
- оцінка можливого антропогенного навантаження;
- економічна оцінка збитків;
- оцінка витрат на запобігання збиткам;
- оцінка ефективності природоохоронних і ресурсозбережних заходів.

Основні методи прогнозування:

- метод аналогій;
- метод екстраполяцій;
- метод інтерполяцій;
- метод експертної оцінки;
- метод моделювання.

Метод аналогій – порівняння прогнозованого явища з добре відомими і дослідженими явищами і процесами.

Метод експертних оцінок – оцінювання тенденцій майбутнього розвитку найкращими спеціалістами у даній сфері дослідження.

Метод моделювання – побудова нормативних і пошукових (імітаційних) моделей з урахуванням бажаної або ймовірної зміни прогнозованого явища на прогнозований період за наявними прямими або непрямыми даними про масштаби і напрямки змін.

Метод екстраполяцій – поширення закономірностей, тенденцій, висновків, отриманих із попередніх достатньо вивчених спостережень, на прогнозовані процеси.

Метод інтерполяцій – виявлення проміжного значення між двома відомими моментами (явищами).

Екологічні прогнози поділяються (за часом):

- короткотермінові – до 2 років;
- середньотермінові – від 3 до 5 років;
- довготривалі або далекотривалі – понад 5 років.

1.2 Основні метеорологічні фактори

Температура – міра кінетичної енергії хаотичного (теплого) руху частинок речовини. У метеорології оперують такими даними:

- *температура приповерхневого шару* і характер її зміни;
- *вертикальний профіль температури* (вертикальний градієнт),
- *середньорічні* (середньосезонні) значення температури;
- *температура окремих ділянок території* та інші.

Температура зазвичай вимірюється в градусах Цельсія ($t^{\circ}\text{C}$) або Кельвіна ($T^{\circ}\text{K}$), причому $T^{\circ}\text{K} = t^{\circ}\text{C} + 273^{\circ}$.

Вітер – горизонтальне переміщення повітряних мас. Тут цікаві такі фактори:

- *швидкість і її зміна,*
- *напрямок руху вітрового потоку,*
- *вертикальний профіль швидкості,*
- *тип вітрового потоку* (циклон, антициклон тощо),
- *стан вітрового прилежового шару,*
- *роза вітрів;*
- *частота повторюваності швидкостей* та низка інших параметрів.

Швидкість вітру зазвичай вимірюється в м/с чи км/год .

Вологість – щільність водяної пари, тобто маса пари в одиниці об'єму повітря. Вологість може бути:

- *абсолютною;*
- *відотною.*

Одиницею виміру вологості зазвичай є *відносна вологість*, тобто виражене у відсотках відношення виміряної щільності пари до щільності насиченої пари при даній температурі.

Рівновагою насичення називається такий стан, коли кількість молекул пари, що залишають поверхню рідини, дорівнює кількості молекул, що повертаються назад.

Тиск – це сила, прикладена в напрямку нормалі до одиниці поверхні, викликана зіткненням молекул з даною поверхнею. Атмосферний тиск у заданій географічній точці фізично представляється як тиск всього атмосферного стовпа над розглянутою точкою. Крім абсолютного значення тиску p , важливим параметром його є *градієнт тиск* – зміна тиску, віднесена до одиниці довжини в якомусь напрямку. На відміну від тиску, що вважається скаляром, градієнт тиску є вектором. Він спрямований у бік *зменшення тиску*. Існує велика кількість одиниць вимірювання тиску:

- атмосфери;
- міліметри ртутного стовпа;
- бари;
- Паскалі та інші.

Наприклад, тиск 760 мм рт. ст. дорівнює 10^5 Паскалів.

Щільність – це маса газу в одиниці об'єму.

$$\rho = m/V, \quad (1.1)$$

де m – маса газу, V – об'єм газу.

Щільність пов'язана з тиском та температурою середовища. Цей зв'язок описується рівнянням стану:

$$p = \rho \cdot R \cdot T, \quad (1.2)$$

де R – газова стала, що залежить від природи газу. Для повітря $R = 287$ Дж/(кг·К).

Хмарний покрив. Хмари складаються з конденсованого водяного пару або кристаликів льоду (на великих висотах). Характер хмарного покриву багато в чому визначає метеорологічну ситуацію біля поверхні Землі і впливає на процеси поширення шкідливих атмосферних домішок (рис. 1.1).

Сонячні промені нагрівають земну поверхню і повітря. В наслідок цього повітря стає менш щільним і піднімається вгору. Коли повітряні потоки досягають більш холодного шару, їх температура знижується і відбувається конденсація водяного пару. Водяна пара утримується в повітрі легкими вертикальними течіями. Утворення різних типів хмар обумовлено температурою, при якій відбувається конденсація. Чим нижча температура утворення, тим густішою стає хмара. Залежно від типу хмари та атмосферних умов утворюється той чи інший вид опадів. Якщо температури, при яких повітря конденсується, занадто низькі, хмара, що утворюється, складається з кристалів льоду.

Ще одним фактором, який впливає на утворення хмар, є рух повітря. Хмари, які створюються, коли повітря знаходиться в стані спокою, як правило, з'являється шарами. Хмари, які утворюються між вітрами або повітрям з сильними вертикальними течіями, мають великий вертикальний розвиток. Зазвичай останні є причиною дощів та штормів.



Рисунок 1.1 Міжнародна класифікація хмар

Опади у вигляді дощу, дощу з градом та снігу суттєво впливають на склад забрудненого атмосферного повітря. Рідкі опади вимірюються у міліметрах (стовпа рідини).

Туман – зважені у повітрі крапельки вологи (переважно води), хімічний склад яких у загальному випадку залежить також від типу та концентрації шкідливих домішок. Туман розташовується в межах шару, що прилягає до поверхні.

Інтенсивність сонячної радіації (інсоляція) вимірюється кількістю променистої енергії (у Джоулях, калоріях тощо), що припадає на одиницю площі поверхні (см^2 , м^2) в одиницю часу (секунду, хвилину).

Стійкість атмосфери. Під стійкістю розуміють здатність повітряного середовища перешкоджати вертикальним рухам і стримувати турбулентність перемішування. У нестійкій атмосфері відбуваються потужні вертикальні переміщення повітря.

Параметри розсіювання забруднювачів у атмосфері, які називають коефіцієнтами дисперсії σ_x , σ_y , σ_z залежать від показників стійкості атмосфери. Наближені співвідношення їх розрахунку наведено далі.

Склад атмосфери. Зміну складу атмосфери відносять переважно до глобальних метеорологічних чинників. Наприклад, природні та техногенні явища, що призводять до зміни концентрації вуглекислого газу, руйнування озонового шару в атмосфері та інші. Локальні параметри атмосфери, і в тому числі її склад, може залежати також від природного або антропогенного забруднення середовища.

Запиленість атмосфери – характеризується рівнем концентрації зважених у середовищі твердих частинок та їх розмірами.

1.3 Теплообмін в атмосфері

Температура приземного шару атмосфери визначається складним тепловим балансом, тобто припливом та відтоком теплової енергії. Як уже було зазначено, первинним джерелом цієї енергії є сонячна радіація. Якщо прийняти річне потрапляння енергії до верхньої межі атмосфери за 100 %, то баланс теплових потоків буде виглядати так: 14 % цієї енергії поглинається атмосферою, 44 % – земною поверхнею, а 42 % енергії відбивається у космічний простір. У свою чергу, частина поглиненою поверхнею енергії йде у простір у вигляді інфрачервоного (теплого) випромінювання (20 %), інша частина витрачається на нагрівання повітря (5,6 %), а третя (28,4 %) – на випаровування вологи (тут наведені спрощені та усереднені показники).

Природно, що реальний тепловий баланс у різних географічних пунктах виглядатиме по-різному. Наприклад, якщо енергію, що надходить безпосередньо до земної поверхні знову ж таки взяти за 100 %, то отримаємо різні рівні відображення в залежності від виду цієї поверхні. Сніговий покрив відбиває 80–85 %, (а поглинає, відповідно 20–15 %), зелена рослинність відображає 26 %, піщана поверхня – 30 %, а водна поверхня – всього 5 %. У свою чергу, *стан хмарного покриву та рівень запиленості атмосфери* визначають величину променистої теплової енергії, що надходить на поверхню. Сонячна радіація, її поглинання та відображення є первинною стадією формування теплового балансу.

Дуже важливими *вторинними тепловими процесами* є такі, як перенесення тепла вітровими потоками, процеси конденсації водяної пари та утворення дрібних крапельок або крижаних частинок в атмосфері. Відомо, що конденсація та замерзання супроводжуються виділенням тепла. В цілому, конденсація водяної пари (що супроводжується утворенням хмар і туману) забезпечує більш значний приплив енергії в атмосферу, ніж нагрів від поверхні Землі.

Стиснення і розширення повітряної частинки супроводжується відповідно підвищенням і зниженням температури. Передача тепла від більш нагрітого середовища до більш холодного може відбуватися за рахунок молекулярної та турбулентної теплопровідності.

1.4 Вертикальний профіль температури

У сухій атмосфері за відсутності активного масопереносу температура зменшується з висотою згідно із законом адіабати, тобто зміна температури та тиску пов'язане співвідношенням

$$p/\rho^\gamma = \text{const}, \quad (1.3)$$

де γ – це показник адіабати. Це відповідає нейтральному (з точки зору стійкості) стану атмосфери. Однак у реальних умовах характер зміни температури з

висотою може бути складнішим. Найбільш типові варіанти поведінки температури в приземному шарі показані на рисунку 1.2 а, б, в.

Сухоадіабатичний градієнт дорівнює приблизно $9,8^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Наближено можна вважати падіння температури з висотою в 1°C на кожні 100 м над поверхнею. Якщо повітря насичене вологою, то набирає чинності дія закону конденсації. У міру руху вгору та зниження температури водяні пари конденсуються і при цьому виділяється теплота. Тому падіння температури з висотою буде менш інтенсивним і становить $5\div 7^{\circ}\text{C}$ на кожен кілометр.

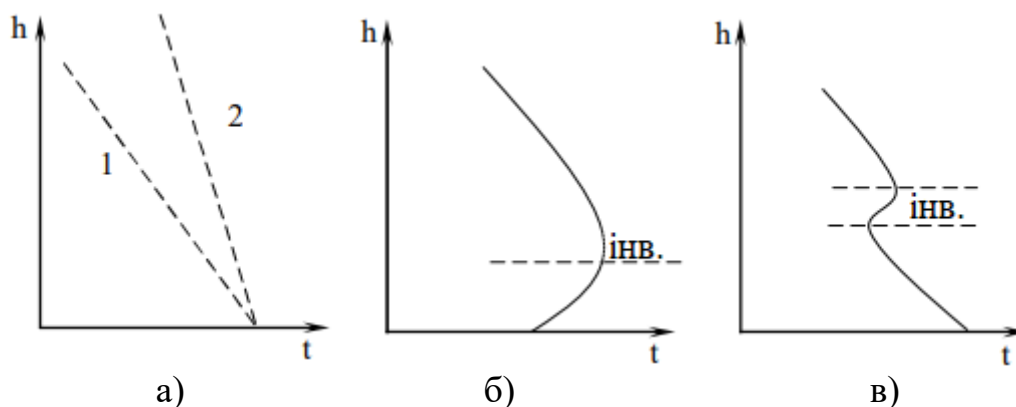


Рисунок 1.2 Залежність температури повітря від висоти:

- а) змінюється за законом адіабати (1 – це суха адіабата, 2 – волога адіабата);
б) приземний шар інверсії; в) піднятий шар інверсії

Іноді виникає вертикальний градієнт температури, що перевищує сухоадіабатичний. Це буває у разі сильного нагрівання земної поверхні за допомогою сонячної радіації. Таке явище призводить до порушення стійкості атмосфери, зумовленого інтенсивною конвекцією (вертикальним переміщенням).

На рисунку 1.2 б, в представлені випадки інверсії (на малюнку – позначено "інв."), тобто такі явища, коли у визначеному приземному шарі температура підвищується з висотою (рис 1.2 б). Метеорологи розрізняють два основні *типи інверсії*. Перший з них називають *радіаційним*, він виникає в результаті охолодження поверхні при безхмарному небі у нічний час (рис. 1.2 б). Нерідко у цей період утворюється туман, що покриває поверхню у вигляді шару обмеженої товщини. Другий випадок інверсії виникає тоді, коли на цю територію надходить тепла повітряна маса. Так як тепле повітря легше за холодне, воно розташовується над холодним шаром (рис. 1.2 в). Можна назвати і інші причини утворення інверсій: наприклад, *опускання повітряних мас над холодним шаром*, при якому в масі, що опускається, відбувається адіабатичний нагрів. Наявність інверсійного шару різко змінює характер поширення шкідливих домішок у атмосфері. В цьому випадку забруднене повітря як би замикається зверху непроникним «покривалом», що призводить до наростання концентрації шкідливих інгредієнтів у приземному шарі.

Як зазначено раніше важливою характеристикою приземної циркуляції є показник стійкості атмосфери. У метеорології прийнято позначати рівень стійкості атмосфери буквами латинського алфавіту: А, В, С, D, Е, F. При цьому стійкість атмосфери підвищується від А до F. Для нестійкої атмосфери характерні потужні конвективні потоки знизу вгору, а також інтенсивне турбулентне перемішування повітря в приземному шарі.

Температурний градієнт при цьому дуже високий – вище на 1°C на 100 м. Така картина виникає при інтенсивному нагріванні земної поверхні. У цих випадках у теплу пору року нерідко з'являються купчасті або купово-дощові хмари, відбуваються зливи, грози, град, шквал тощо. Нестійка атмосфера часто буває влітку після полудня, коли нагрівається приземний шар повітря і виникають сильні висхідні та низхідні потоки (такі явища пасажирями літаків сприймаються як повітряні ями).

До речі, грози та шквали, як правило, відбуваються після полудня.

Стійка атмосфера реалізується при малих вертикальних градієнтах температури, і особливо, у випадках інверсії. У такому випадку над нижнім холодним шаром знаходиться легший, тепліший шар, і це явище не сприяє вертикальному руху повітря. В інших випадках, коли тепла частина впливає вгору, то при цьому вона витрачає внутрішню енергію на своє розширення (за адіабатичного закону) та її температура стає нижчою, ніж у довкіллі. Піднята частка матиме велику щільність і почне повільно опускатися назад на попередню висоту.

Такі явища також притаманні для стійкої атмосфери.

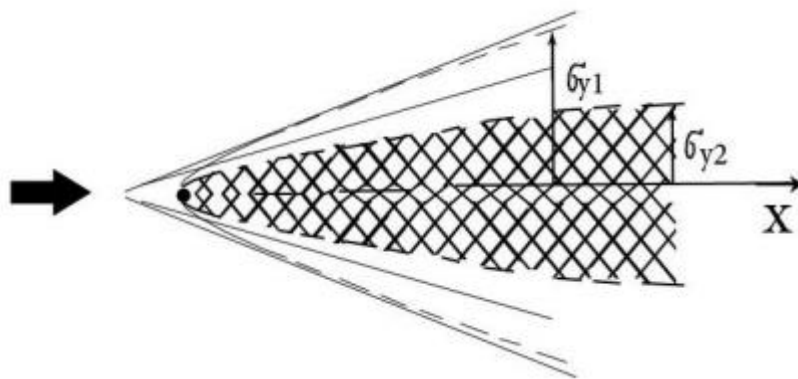


Рисунок 1.3 Бічна дисперсія при нестійкій атмосфері (σ_{y1}) і при великій стійкості (σ_{y2}), стрілкою вказано напрям вітру

Показники стійкості атмосфери суттєво впливають на величину бічної та вертикальної дисперсії, розсіювання струменя забруднюючої газової суміші, яка надходить від джерела викидів (наприклад, з димової труби). На рисунку 1.3 схематично показано слід струменя забрудненого газу на земній поверхні при різних значеннях бічної дисперсії σ_{y1} (вигляд зверху).

Відомо, що дисперсія за наявності вітру обумовлена в основному турбулентним перенесенням забруднюючої речовини (і незначною мірою – молекулярною дифузією). У разі повного штилю, коли швидкість вітру дорівнює нулю, дисперсія здійснюється за рахунок молекулярної дифузії. Параметри розсіювання (дисперсії) (σ_y , σ_z виражаються через коефіцієнт дифузії μ_y та μ_z в вигляді:

$$\sigma_y^2 = 2\mu_y \cdot x, \sigma_z^2 = 2\mu_z \cdot x. \quad (1.4)$$

Значення σ_y , σ_z , і відповідно, μ_y та μ_z , знаходять за допомогою експериментальних вимірів. Існують також наближені емпіричні вирази та узагальнені графічні залежності. Розрахункові формули мають вигляд (4):

$$\sigma_y^2 = \alpha_y \cdot \frac{x}{S_1(x)}, \sigma_z^2 = \alpha_z \cdot \frac{x}{S_2(x)}, \quad (1.5)$$

$$S_1(x) = \sqrt{1 + \beta_1 \cdot x}, S_2(x) = \sqrt{1 + \beta_2 \cdot x}, \beta_1 = 10^{-4}.$$

Значення параметрів задаються таблицею 1.1.

Таблиця 1.1

Значення параметрів розсіювання α_y , α_z , β_2			
Клас стійкості	α_y	α_z	β_2
A	0,22	0,2	0
B	0,16	0,12	0
C	0,11	0,08	$1,5 \cdot 10^{-4}$
D	0,08	0,06	$2 \cdot 10^{-4}$
E	0,06	0,03	$3 \cdot 10^{-4}$
F	0,04	0,02	$3 \cdot 10^{-4}$

1.5 Питання для самоконтролю

1. Дати визначення поняттю *температура*, види та одиниці вимірювання?
 2. Дати визначення поняттю *вітер*, назвати фактори, що впливають на його утворення?
 3. Дати визначення поняттю *вологість*, які одиниці вимірювання? Що таке абсолютна та відносна вологість?
 4. Дати визначення поняттю *тиск*, які одиниці вимірювання?
 5. Дати визначення поняттю *щільність*, які одиниці вимірювання?
 6. Що впливає на формування *хмарного покриву*?
 7. Що таке *туман*, як він утворюється?
 8. Що таке *інсоляція*?
 9. Як відбувається теплообмін в атмосферному повітрі? Як змінюється вертикальний профіль температури?
 10. Що таке стійкість атмосфери? Скільки та які існують класи стійкості?
- Дисперсія, як визначається та від чого залежить?

1.6 Тестові завдання

Тест 1. Метеорологічні фактори, що визначають характер міграції атмосферних забруднень

1. Що таке температура?

- а) міра кінетичної енергії хаотичного (теплого) руху ☐;
частинок речовини
- б) міра потенційної енергії хаотичного (теплого) руху ☐;
частинок речовини
- в) міра повної енергії хаотичного руху частинок речовини ☐;
- г) міра енергії хаотичного руху частинок речовини ☐;

2. В яких одиницях вимірюється температура?:

- а) °C ☐;
- б) °C, °K ☐;
- в) Па ☐;
- г) Дж ☐;

3. Яку температуру розрізняють?

- а) температура приповерхневого шару ☐;
- б) вертикальний профіль температури та середньорічні ☐;
- в) температура окремих ділянок території ☐;
- г) усі перелічені вище ☐.

4. Що таке вологість?

- а) маса водяної пари в одиниці об'єму повітря ☐;
- б) об'єм водяної пари в одиниці маси повітря ☐;
- в) кількість молекул в одиниці об'єму повітря ☐;
- г) кількість молекул в одиниці маси повітря ☐.

5. Що таке тиск?

- а) сила, прикладена в напрямку нормалі до одиниці поверхні, викликана зіткненням молекул з даною поверхнею. ☐;
- б) маса, що діє на одиницю поверхні; ☐;
- в) об'єм, що діє на одиницю поверхні; ☐.
- г) енергія, що діє на одиницю поверхні ☐.

6. В яких одиницях вимірюється тиск?

- а) атм ☐;
- б) мм рт ст ☐;
- в) бар, Па ☐;
- г) усе перелічене вище ☐.

7. Що таке щільність?

- а) кількість молекул газу в одиниці об'єму ☐;
- б) маса газу в одиниці об'єму ☐;
- в) об'єм газу в одиниці маси ☐;
- г) кількість молекул газу в одиниці маси ☐.

8. Що впливає на утворення хмар?

- а) температура нагрівання Землі ☐;
- б) рух повітря ☐;
- в) поверхня ☐;
- г) усе перелічене вище ☐.

9. Що таке інсоляція?

- а) інтенсивність сонячної радіації ☐;
- б) кількість сонячних променів ☐;
- в) температура нагрітої поверхні ☐;
- г) випромінювання поверхні ☐.

10. Що визначає коефіцієнт дисперсії?

- а) розсіювання забруднювачів у атмосфері ☐;
- б) стійкість атмосфери ☐;
- в) склад атмосфери ☐;
- г) запиленість атмосфери ☐.

11. Чим характеризується запиленість атмосфери?

- а) концентрації зважених у атмосферному середовищі твердих частинок ☐;
- б) концентрації зважених у атмосферному середовищі твердих частинок та їх розмірами ☐;
- в) розмірами зважених у атмосферному середовищі твердих частинок ☐;
- г) жодна відповідь не правильна ☐.

12. Як записується закон адіабати?

- а) $p/m^\gamma = \text{const}$ ☐;
- б) $p/V^\gamma = \text{const}$ ☐;
- в) $p/\rho^\gamma = \text{const}$ ☐;
- г) $pm^\gamma = \text{const}$ ☐.

13. В процесі інверсії?

- а) температура підвищується з висотою ☐;

- б) температура понижується з висотою ☐;
- в) температура не змінюється з висотою ☐;
- г) немає правильної відповіді ☐.

14. В процесі інверсії?

- а) концентрації шкідливих інгредієнтів у приземному шарі зростає ☐;
- б) концентрації шкідливих інгредієнтів у приземному шарі зменшується ☐;
- в) концентрації шкідливих інгредієнтів у приземному шарі не змінюються ☐;
- г) немає правильної відповіді ☐.

15. Скільки існує класів стійкості атмосфери?

- а) 3 ☐;
- б) 4 ☐;
- в) 5 ☐;
- г) 6 ☐.

2. Закони руху повітряних потоків

Мета: ознайомити з основами законами руху повітряних мас в атмосфері.

Первинною причиною існування повітряних течій є енергія, що надходить від Сонця. Але, атмосфера є практично прозорою для сонячної радіації. Теплова енергія надходить у нижні шари атмосфери від нагрітої Сонцем поверхні Землі.

2.1 Закони атмосферної циркуляції

Причину атмосферної циркуляції можна проілюструвати схемою, запропонованої на рисунку 2.1. Земна поверхня нагрівається нерівномірно. Розглянемо холодну (праворуч) і теплу (ліворуч) ділянки поверхні, розташовані на деякій відстані одна від одної. Одна із них може бути поверхнею суші, а інша – водною поверхнею (хоча це й не обов'язково). Над теплою ділянкою нагріте (легше) повітря піднімається вгору і тут виникає зона зниженого тиску. Холодне, важче, повітря над другою ділянкою опускається вниз, що призводить до зростання тиску на поверхні. Таким чином, виникає горизонтальний градієнт тиску, що має напрямок справа наліво. Це призводить до появи повітряного потоку – *вітру*. Відповідно до закону збереження маси відтік повітря в приземному шарі (нижня частина комірки) має бути компенсовано припливом зліва направо (на якійсь висоті від поверхні). Таким чином, формується

замкнутий осередок циркуляції. Відстань між ділянками може бути досить великою, що при значній різниці температур породжує велику вітрову систему.

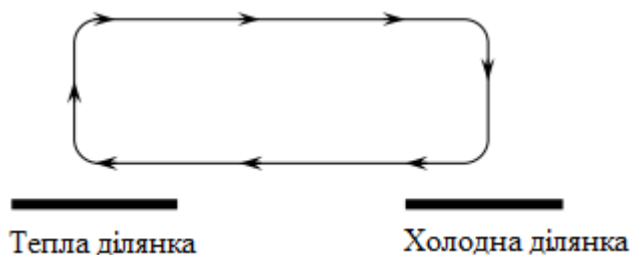


Рисунок 2.1 Найпростіший осередок циркуляції повітря

Отже, наведена схема дозволяє зробити деякі висновки:

- основним джерелом циркуляції є нерівномірне нагрівання поверхні;
- циркуляція починається з вертикального переміщення повітря;
- над кожною точкою поверхні реалізується два протилежні потоки – один на малій висоті (приземний вітер), а інший – на великій висоті;
- циркуляційний осередок завжди буде замкнутим, хоча конфігурація його може бути значно складнішою, ніж на рисунку 2.1.

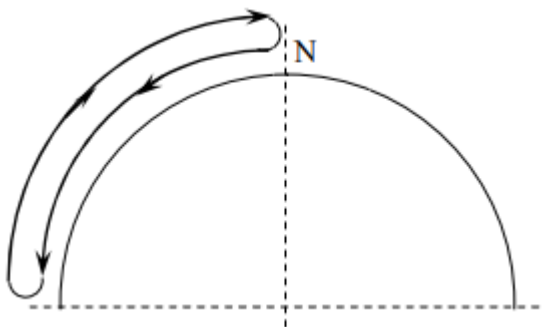


Рисунок 2.2 Глобальна циркуляційна комірка

Якщо використовувати цю схему в глобальному масштабі, тоді циркуляційний осередок виглядає так: над екватором повітря піднімається вгору, а над полюсом опускається вниз. Утворюється приземний вітер, який у північній півкулі спрямований із півночі на південь (рис. 2.2).

Враховуючи, однак, що поверхня Землі нагрівається нерівномірно, а сама Земля обертається навколо своєї осі, реальна картина виглядає набагато складніше. Глобальний осередок розпадається на трохи менші осередки, напрям вітру теж змінюється. Ближчою до дійсності є трикомірна циркуляція (рис. 2.3).

Нерівномірне нагрівання поверхні та викликана нагріванням циркуляція називаються термічним фактором. Проте формування вітрових систем може відбуватися і з інших причин. Наявність перешкод типу гірських масивів або взаємодія окремих вітрових систем, наприклад, холодного і теплого фронтів, також породжує спеціальні типи циркуляції. Сукупність цих явищ називають

динамічним чинником. Нарешті, напрямок швидкості вітру істотно залежить від обертання Землі навколо своєї осі.

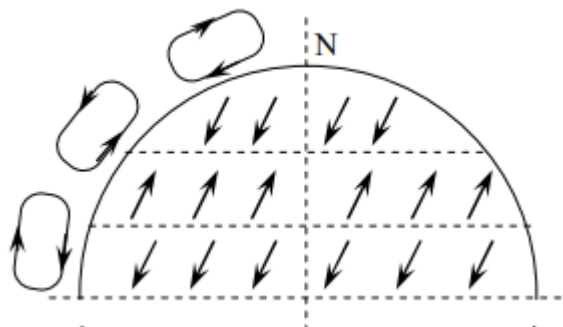


Рисунок 2.3 Трикомірна циркуляційна система

Ефект обертання призводить до відхилення вектора швидкості рухомої частинки повітря праворуч (у північній півкулі) і ліворуч (у південній півкулі) (рис. 2.3).

2.2 Сили, що визначають переміщення повітряних мас

На частку газу в атмосфері діє декілька сил:

- сила баричного градієнта;
- сила тяжіння;
- центробіжна сила;
- сила тертя;
- сила Коріоліса.

При дії декількох сил відбувається їхнє векторне складення і вони можуть бути зведені до однієї рівнодіючої сили. Якщо рівнодіюча сила дорівнює нулю, тоді частка перебуває у спокої (щодо даної системи координат) або ж рухається з постійною швидкістю прямолінійною траєкторією. Порухення рівноваги сил призводить до зміни швидкості за величиною, напрямку або за обома ознаками. В аналізі поширення забруднення часто постулюється сталість швидкості повітря впродовж будь-якого розрахункового періоду. В іншому випадку течія стає нестаціонарною, що набагато ускладнює завдання.

Розглянемо кожну з вищеназваних сил окремо.

Сила баричного градієнта F_p пропорційна зміні тиску на одиницю довжини в обраному напрямі x , а саме $\partial p / \partial x$ (частинна похідна від p по x). У рівнянні руху газової частинки, записаному у векторній формі, замість названої похідної записують вектор-градієнт $\text{grad } p$ зі знаком мінус, тому що напрям цього вектора протилежний прискоренню частки $\frac{d\vec{V}}{dt}$ (частка рухається у бік зменшення тиску).

Сила тяжіння F_g пропорційна прискоренню земного тяжіння $\vec{g}$. При оцінці горизонтального переміщення частинок, повітря вважається невагомим, тобто силою тяжіння зазвичай нехтують.

Центробіжна сила F_c виникає при русі частинок по криволінійній траєкторії. Вона прямо пропорційна квадрату швидкості руху цієї частинки V^2 і обернено пропорційна радіусу кривизни r (відстань до центру обертання). Цю силу необхідно враховувати в циклонічних та антициклонічних вітрових системах.

Сила тертя $F_{тр}$ виникає тільки в газі, що рухається, і залежить від величини дотичного напруження τ , яке пропорційне зміні швидкості по нормалі до лінії струму, тобто $\frac{d\vec{V}}{dn}$. При русі газу вздовж земної поверхні відбувається уповільнення швидкості, обумовлене якраз величиною тертя.

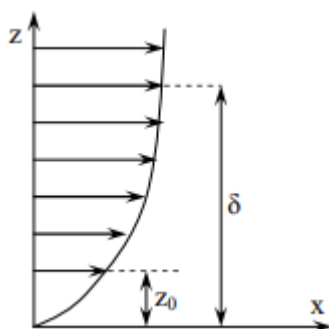


Рисунок 2.4 Зміна швидкості в приземному шарі

На рисунку 2.4 показано зміну швидкості потоку залежно від висоти над поверхнею землі z (це якраз і є напрямком нормалі). Зауважимо, що коли $z=0$ маємо $V=0$. Для спрощення аналізу припускають, що сили тертя діють лише в межах тонкого приземного шару, що примикає до поверхні. Його товщина δ встановлена експериментальним шляхом і лежить у межах $0,5 \div 1,5$ км. Течія у цьому шарі практично завжди має турбулентний характер, а його аналіз становить основу для розрахунків поширення забруднень у атмосфері. Оскільки поверхня Землі не є гладкою (нерівність рельєфу, рослинний покрив, міські забудови тощо), іноді вважають, що швидкість дорівнює нулю $V=0$, за деякого значення z_0 (рис. 2.4). Залежність $V(z)$ у цьому випадку показана пунктиром. Величина z_0 вибирається залежно від «шорсткості» місцевості і лежить у межах кількох десятків сантиметрів.

Сила Коріоліса F_k є інерційною силою, яка змінює напрямок руху частинки повітря, якщо спостерігати за нею з поверхні Землі, що обертається. Щоб зрозуміти походження цієї сили розглянемо, як приклад, рух частинки з північного полюса (точка N) у напрямку до екватора (точка P), тобто вздовж меридіана.

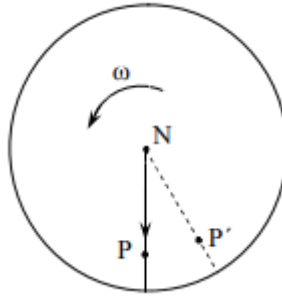


Рисунок 2.5 Видимий рух частки внаслідок обертання Землі з кутовою швидкістю ω

При русі частинки напрямок меридіана змінюється в результаті обертання Землі і у кінці спостерігач, що знаходиться у точці P, переміщується у точку P'. Спостерігачу здається, що рухома частка відхиляється від меридіана вправо, якщо дивитися в бік руху. Можна показати, що в північній півкулі швидкість буде завжди відхилятися вправо, незалежно від напрямку руху (навіть у випадку, якщо воно спрямоване перпендикулярно меридіану). У південній півкулі, навпаки, швидкість буде відхилятися вліво. Ці відхилення швидкості пов'язують із дією сили, що називається силою Коріоліса. З точки зору спостерігача північний вітер стає північно-східним, а південний вітер – південно-західним (рис. 2.5). Можна показати, що сила Коріоліса визначається виразом:

$$F_k = m \cdot V \cdot f, \quad (2.1)$$

де $f = 2 \cdot \omega \cdot \sin \varphi$, ω – кутова швидкість обертання Землі ($\omega = 7,292 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$), φ – географічна широта аналізованої точки, m – маса частки, V – швидкість її руху. Оскільки на екваторі $\varphi=0^\circ$, а на полюсі $\varphi=90^\circ$, сила Коріоліса на екваторі дорівнює нулю, а на полюсі буде максимальною.

Таким чином, рівняння руху атмосферної частинки з одиничною масою в загальному випадку можна записати виразом:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_p + \vec{F}_g + \vec{F}_c + \vec{F}_{mp} + \vec{F}_k. \quad (2.2)$$

Як було встановлено раніше, вважаємо $\vec{F}_g = 0$. Якщо частка рухається з постійною швидкістю, тоді $\frac{d\vec{V}}{dt} = 0$ і спостерігається рівновага сил, що у правій частині рівняння (2.2). Розглянемо деякі окремі часткові випадки рівноважних станів. Одне з них призводить до виникнення *геотропічного* вітру, коли $\vec{F}_c = \vec{F}_{mp} = 0$. У цьому випадку маємо:

$$\vec{F}_p + \vec{F}_k = 0. \quad (2.3)$$

Такий вітер можна спостерігати на певній висоті (за межами прибережного шару) у разі, якщо лінії струму не викривлені, а спостерігач знаходиться на екваторі. Рівновага сил (2.3) можна представити у вигляді:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 2 \cdot V_g \cdot \omega \cdot \sin \varphi. \quad (2.4)$$

Вітер спрямований вздовж осі x . Звідси геотропічна швидкість вітру дорівнює:

$$V_g = \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot \omega \cdot \sin \varphi} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (2.5)$$

Якщо градієнт тиску дорівнює 1 мб на 100 км, діюча на частинку сила дорівнює $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2$, $\rho = 1,2 \text{ кг} / \text{м}^3$, $\omega = 7,292 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, $\varphi = 30^\circ$, тоді $V_g \approx 11,4 \text{ м} / \text{с}$. Нагадаємо, що 1 мб (миллібар) відповідає тиску 0,75 мм ртутного стовпчика, оскільки $100000 \text{ Па} = 1 \text{ бар} \approx 750,0616827 \text{ мм.рт.ст.}$

При русі повітря по криволінійній траєкторії виникає рівновага трьох сил:

$$\vec{F}_p + \vec{F}_c + \vec{F}_k = 0. \quad (2.6)$$

Для одиничної маси маємо:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 2 \cdot V_g \cdot \omega \cdot \sin \varphi + \frac{V_g^2}{r}. \quad (2.7)$$

Рух повітря під дією таких сил називають *градієнтним вітром*, а швидкість вітру називають *градієнтною швидкістю*. Градієнтний вітер реалізується в циклоні та антициклоні (за межами прикордонного шару). Приземний вітер представляє собою потік, в якому, крім названих вище сил, діє також і сила тертя.

Розглянемо графічну діаграму вітрових потоків, про які йдеться. На рисунку 2.6 зображено еволюцію утворення геотропічного вітру.

Передбачається, що ізобари представляють собою прямі лінії. Градієнт тиску спрямований знизу нагору. Припустимо, що частинка повітря почала рух з точки А вгору під дією сили $\vec{F}_p$. Як тільки почався рух, виникає сила Коріоліса (при нульовій швидкості частинки вона теж дорівнювала нулю). Під дією двох сил швидкість потоку змінює напрям (траєкторія частинки показана пунктиром). У точці В встановлюється рівновага сил $\vec{F}_p$ і $\vec{F}_k$, геотропічна швидкість буде спрямована вздовж ізобар.

Нагадаємо, що таку ідеалізовану картину можна спостерігати вище прибережного шару. Якщо врахувати силу тертя у прибережному шарі, тобто ближче до поверхні Землі, то матимемо діаграму сил, показану на рисунку 2.7.

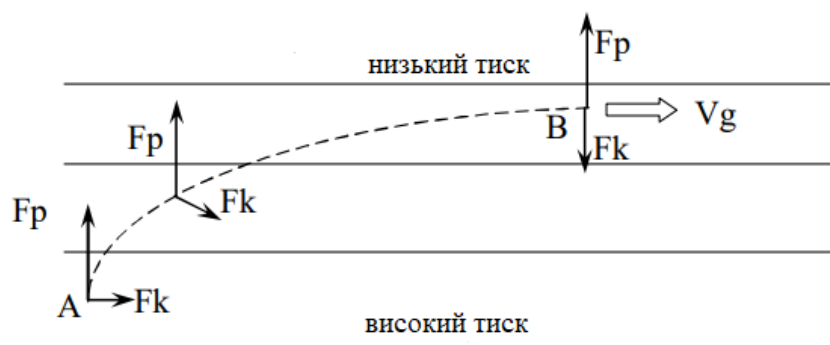


Рисунок 2.6 Встановлення геотропічного вітру у північній півкулі

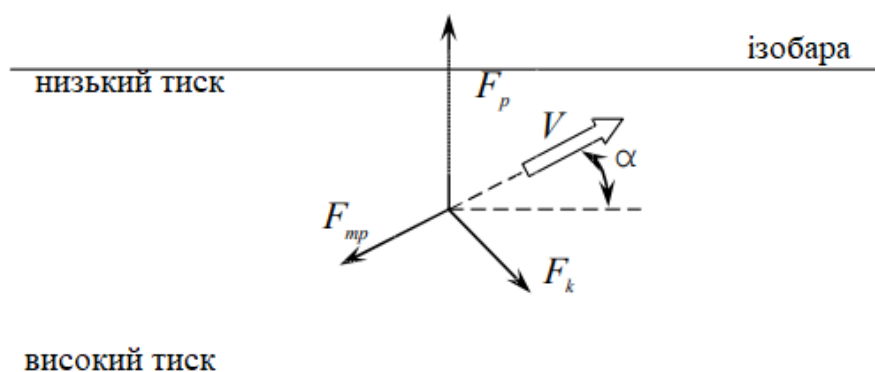


Рисунок 2.7 Діаграма сил у приземному вітрі

З діаграми видно, що швидкість вітру під дією трьох сил $\vec{F}_p$, $\vec{F}_k$, $\vec{F}_{mp}$ спрямована під кутом α до ізобар. Оскільки за межами прикордонного шару цей кут дорівнює нулю, виходить, що з опусканням вниз, величина α збільшується. На висоті 10 м, на якій зазвичай вимірюється приземний вітер, цей кут може досягати 40° і більше. Діаграми градієнтного вітру в циклоні та антициклоні показані на рисунку 2.8.

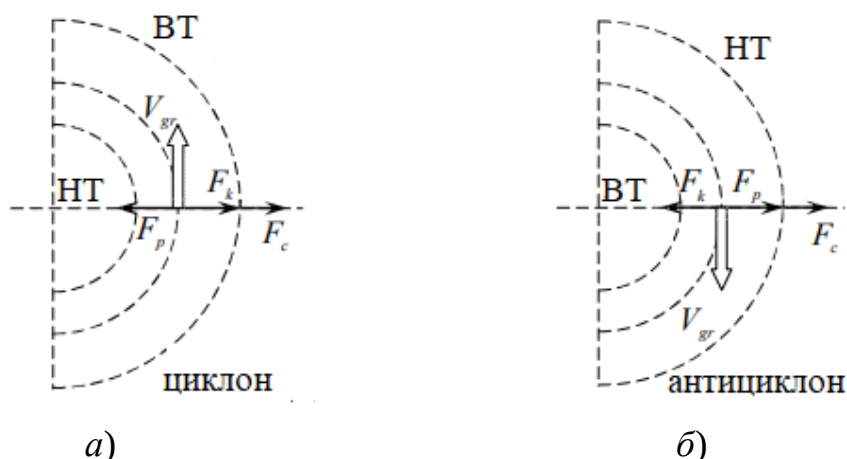


Рисунок 2.8 Встановлення градієнтного вітру в циклоні та антициклоні (північна півкуля): а – циклон; б – антициклон

З рисунка 2.8 видно, що у циклоні

$$\vec{F}_p = \vec{F}_k + \vec{F}_c, \quad (2.8)$$

а в антициклоні

$$\vec{F}_p = \vec{F}_k - \vec{F}_c. \quad (2.9)$$

Якщо зважити на силу тертя, то в циклоні вектор швидкості вітру перетинатиме ізобари у напрямку до центру. Тиск у центрі циклону буде зростати і енергія циклону зменшується. У цьому випадку кажуть, що відбувається заповнення депресії. В антициклоні вектор швидкості перетинає ізобари у напрямку від центру, що призводить до розсіювання центру антициклону. За допомогою рівняння рівноваги сил можна показати, що в антициклоні швидкість руху повітря буде більшою, ніж у циклоні.

2.3 Питання для самоконтролю

1. В чому полягають причини атмосферної циркуляції?
2. За рахунок чого формується замкнутий осередок циркуляції?
3. З яких причин може відбуватися формування вітрових систем?
4. Які сили діють на частку газу в атмосфері?
5. Дати визначення *силі тяжіння*?
6. Дати визначення *центробіжній силі*?
7. Дати визначення *силі тертя*?
8. Дати визначення *силі Коріоліса*?
9. При геотропічному вітрі виникає рівновага яких сил?
10. При русі повітря по криволінійній траєкторії виникає яких сил?

2.4 Тестові завдання

Тест 2. Закони руху повітряних потоків

1. Що призводить до появи повітряного потоку?
 - а) горизонтальний градієнт тиску ☐;
 - б) вертикальний градієнт тиску ☐;
 - в) градієнт сили ☐;
 - г) жодна відповідь не правильна ☐.

2. Що є основним джерелом циркуляції?
 - а) вертикальне переміщення повітря ☐;
 - б) нерівномірне нагрівання поверхні ☐;
 - в) реалізація двох протилежних потоків ☐;
 - г) усе перелічене вище ☐.

3. Чим обумовлена циркуляція повітря?
 - а) термічним фактором ☐;
 - б) динамічним фактором ☐.

- в) термічним фактором та динамічним факторами ☐;
г) жодна відповідь не правильна ☐.

4. Які сили діють на частку газу в атмосфері?

- а) сила баричного градієнта та сила тяжіння ☐;
б) центробіжна сила та сила тертя ☐;
в) сила Коріоліса ☐;
г) усі сили, перелічені вище ☐.

5. Сила тяжіння?

- а) виникає при русі частинок по криволінійної траєкторії; ☐;
б) пропорційна прискоренню земного тяжіння; ☐;
в) виникає тільки в газі, що рухається, і залежить від величини дотичного напруження; ☐;
г) змінює напрямок руху частинки повітря ☐.

6. Центробіжна сила?

- а) виникає при русі частинок по криволінійної траєкторії; ☐;
б) пропорційна прискоренню земного тяжіння; ☐;
в) виникає тільки в газі, що рухається, і залежить від величини дотичного напруження; ☐;
г) змінює напрямок руху частинки повітря ☐.

7. Сила тертя?

- а) виникає при русі частинок по криволінійної траєкторії; ☐;
б) пропорційна прискоренню земного тяжіння; ☐;
в) виникає тільки в газі, що рухається, і залежить від величини дотичного напруження; ☐;
г) змінює напрямок руху частинки повітря ☐.

8. Сила Коріоліса?

- а) виникає при русі частинок по криволінійної траєкторії; ☐;
б) пропорційна прискоренню земного тяжіння; ☐;
в) виникає тільки в газі, що рухається, і залежить від величини дотичного напруження; ☐;
г) змінює напрямок руху частинки повітря ☐.

9. При виникненні *геотропічного* вітру?

- а) $\vec{F}_c = \vec{F}_k = 0$ ☐;
б) $\vec{F}_c = \vec{F}_{mp} = 0$ ☐.

в) $\vec{F}_p = \vec{F}_{mp} = 0$ ☐;

г) $\vec{F}_k = \vec{F}_{mp} = 0$ ☐.

10. При русі повітря по криволінійній траєкторії виникає?

а) рівновага двох сил $\vec{F}_p + \vec{F}_k = 0$ ☐;

б) рівновага трьох сил $\vec{F}_p + \vec{F}_c + \vec{F}_k = 0$ ☐;

в) рівновага двох сил $\vec{F}_c + \vec{F}_k = 0$ ☐;

г) рівновага трьох сил $\vec{F}_p + \vec{F}_c + \vec{F}_g = 0$ ☐.

11. Де реалізується градієнтний вітер?

а) в циклоні ☐;

б) в антициклоні ☐;

в) в циклоні та антициклоні ☐;

г) в циклоні та антициклоні (за межами прикордонного шару) ☐.

12. Яке співвідношення сил вірне для циклону?

а) $\vec{F}_p = \vec{F}_k + \vec{F}_c$ ☐;

б) $\vec{F}_p = \vec{F}_k - \vec{F}_c$ ☐;

в) $\vec{F}_k = \vec{F}_p + \vec{F}_c$ ☐;

г) $\vec{F}_k = \vec{F}_p - \vec{F}_c$ ☐.

13. Яке співвідношення сил вірне для антициклону?

а) $\vec{F}_p = \vec{F}_k + \vec{F}_c$ ☐;

б) $\vec{F}_p = \vec{F}_k - \vec{F}_c$ ☐;

в) $\vec{F}_k = \vec{F}_p + \vec{F}_c$ ☐;

г) $\vec{F}_k = \vec{F}_p - \vec{F}_c$ ☐.

14. Що характерне для циклону?

а) вектор швидкості вітру перетинатиме ізобари у напрямку до центру ☐;

б) тиск у центрі циклону буде зростати і енергія циклону зменшується ☐;

в) відбувається заповнення депресії ☐;

г) усе перелічене вище ☐.

15. Що характерне для антициклону?

- а) вектор швидкості перетинає ізобари у напрямку від центру ☐;
б) відбувається розсіювання в центрі антициклону ☐;
в) в антициклоні швидкість руху повітря буде більшою, ніж у циклоні ☐;
г) усе перелічене вище ☐.

3. Вітрові системи

Мета: ознайомити з утворенням вітрових систем

Первинною причиною існування повітряних течій є енергія, що надходить від Сонця. Але, атмосфера є практично прозорою для сонячної радіації. Теплова енергія надходить у нижні шари атмосфери від нагрітої Сонцем поверхні Землі.

3.1 Утворення різного роду вітрових потоків

Потужні вітрові системи утворюються, перш за все, на межі суші та океанів. Океанські води та материки мають різну теплоємність. Вода нагрівається і остиває повільніше, ніж тверда речовина суші. Це призводить до добової та сезонної різниці температур водної та материкової поверхні, а, отже, і до виникнення вітру відповідного напрямку. Влітку материк тепліший за океан і тому виникає циркуляційний осередок із приземним вітром, який спрямований із моря у бік суші (рис. 3.1).

Взимку океан зберігає тепло довше і буде теплішим за материк. Тому циркуляційний потік спрямований у зворотному напрямку – з суші на море. В принципі літній циркуляційний осередок має більшу енергію, ніж зимова. Справа в тому, що в повітрі, що піднімається над океаном, відбувається конденсація вологи з виділенням величезної теплової енергії. Найбільш помітно реалізується ця система в прибережних районах Індійського океану, вздовж західного берега Африки (від 5° до 15° пн.ш.) та інших місцях. На початку літа настає період *мусонів*, що дують з океану і несуть тепло, вологу і опади. Взимку над Азіатським континентом встановлюється високий тиск і реалізуються вітри переважно північно-східного напрямку, які несуть суху холодну погоду. Цей вітер іноді називають *зимовим мусоном*. На рисунку 2.3, де зображена схема трикомірної циркуляції, показані стійкі зони північно-східних вітрів середніх широт. Насправді в середніх широтах північної півкулі картина істотно складніша, особливо у віддалених від морів і океанів областях. Зокрема, на Європейській території відбувається складна взаємодія області Атлантики (течії Гольфстрім, полярної області, континентальної області північно-східної Азії, середземноморського регіону та прилеглої до нього північної Африки).

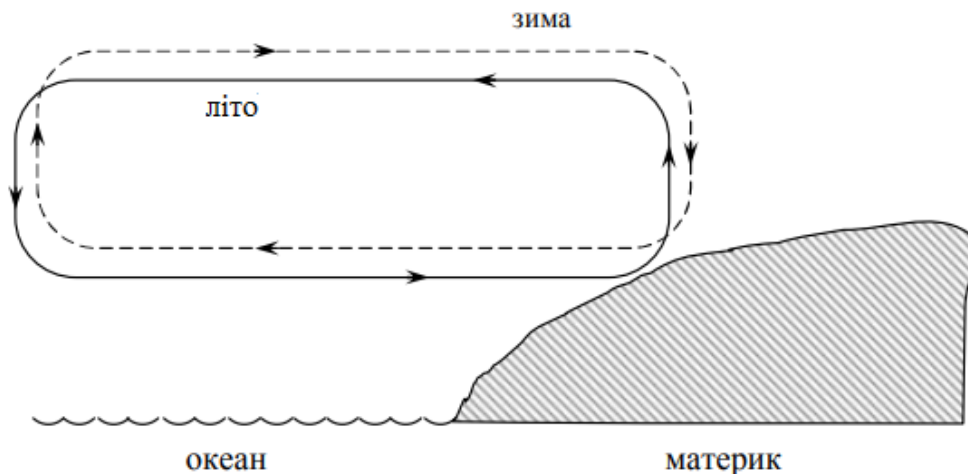


Рисунок 3.1 Циркуляція повітря на межі суші та моря в літній період (суцільна лінія) та взимку (пунктирна лінія)

Істотно впливає на силу та напрям вітру рельєф місцевості та, в першу чергу, гірські хребти, наявність гірської гряди, яка поряд з долиною, або рівнинною місцевістю породжує вітрові потоки різної інтенсивності. Одна з таких течій показано на рисунку 3.2.

Повітряний потік, рухаючись зліва направо, перевалює через гірську гряду та утворює вітри різного характеру. Один з них – сухий, теплий вітер, званий феном. Утворюється він таким чином:

- тепле повітря зліва піднімається вгору, постійно охолоджуючись, при цьому настає температура конденсації та випадають опади;
- переваливши через гору, сухе повітря опускається вниз і стискається адіабатично;
- температура повітря справа на одному й тому рівні буде більше, ніж зліва.

За таких умов можуть бути і потоки іншого типу. Якщо у верхньому положенні повітря не втратило всієї вологи, то справа теж можуть випадати опади і фен може бути вісником дощової погоди. Якщо за гірською грядою буде поверхня моря, то в зимовий період над більш теплою водною поверхнею утворюється розрідження. За наявності перевалу в гірському хребті через нього спрямовується сильний потік холодного повітря з суші. Такий вітер, званий *бора*, виникає у деяких прибережних територіях. Нерідко ці вітри набувають ураганної сили, викликають шторм на морі, засипають місто снігом або покривають поверхню Землі товстою крижаною кіркою.

Отже, ми розглянули вітрові системи, що утворюються над територіями, де межують море і суша, або ж гірський хребет та рівнина. Однак над земною поверхнею значну частину часу панують течії складнішого, *вихрового* характеру, тобто *циклони та антициклони*.

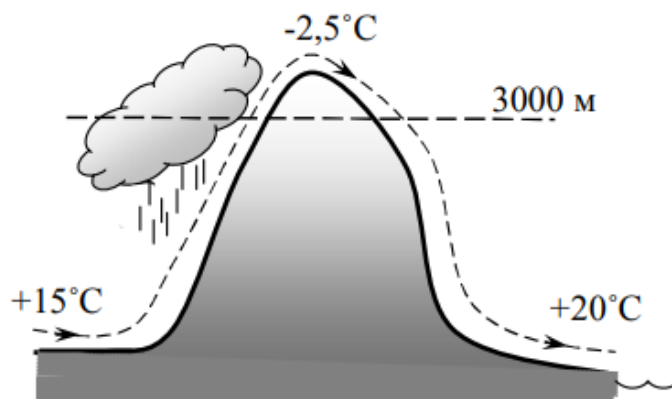


Рисунок 3.2 Утворення течії типу фена

Крім того, над поверхнею океану іноді утворюються сильні *тропічні урагани*. Ці вихрові потоки мають велику енергію і властивість безперервного переміщення по досить складній траєкторії, взаємодіють з іншими вітровими системами, що створює певні труднощі для фахівців з екологічного прогнозування, оскільки передбачувані погодні умови, сприяють якісній оцінці при екологічному прогнозуванні поширення забруднень у повітряному середовищі. Течії вихрового типу можуть виникати з причин термічного характеру (різниця температур) або ж динамічного характеру (взаємодія теплих та холодних фронтів). Розглянемо спочатку першу групу причин. На рисунку 3.3 зображені течії, що виникають на околиці теплої (ліворуч) і холодної (праворуч) частини на поверхні Землі.

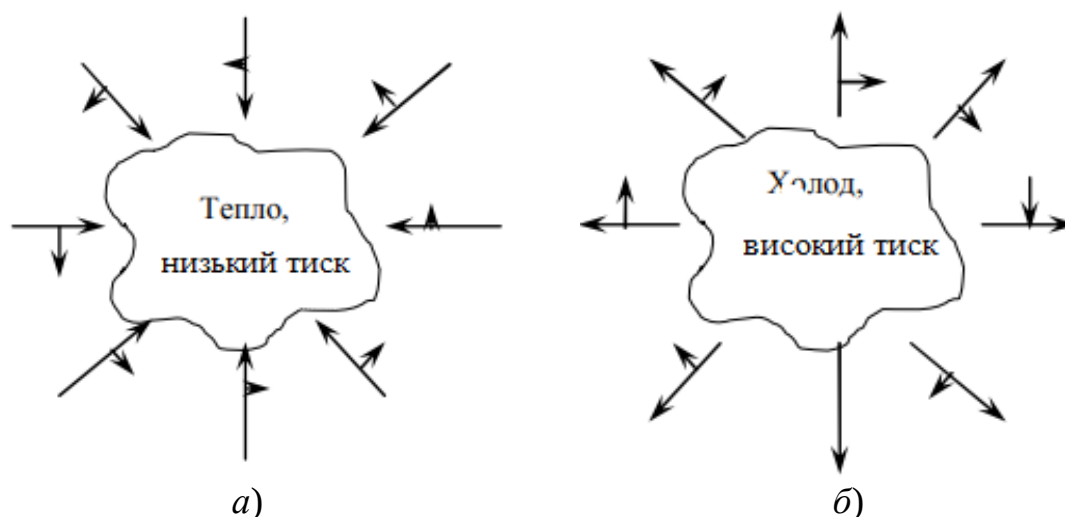


Рисунок 3.3 Утворення вихрових течій: *а* – циклонічного характеру; *б* – антициклонічного характеру

Над теплою ділянкою повітря піднімається вгору, що викликає горизонтальний потік, спрямований до центру. У північній півкулі швидкість потоку відхиляється праворуч (додаткова стрілка), що викликано дією сили Коріоліса.

З'являється вихровий рух проти годинникової стрілки. У масштабному випадку цей потік стає циклоном. У повітрі, що піднімається над центром циклону, відбувається конденсація вологи, утворюються хмари та опади. Переміщення циклону, зазвичай що відбувається по спіралі, приносить на територію, де він проходить, теплі та вологі маси з опадами. Такого типу вихрові течії на території Європи можуть виникати, наприклад, над Середземним морем біля берегів північної Африки або над північними районами Атлантики (над Гольфстрімом). У вихровому русі антициклонного характеру повітря над холодною поверхнею опускається вниз, а потім розходить по променях від центру. Вплив сили Коріоліса повертає вектор швидкості праворуч і, зрештою, потік рухається за годинниковою стрілкою. Антициклон зазвичай несе холодну, суху, іноді безхмарну погоду. Такого типу антициклон може зароджуватися, наприклад, у північно-східній Азії (район Верхоянська), над Центральною Азією (Монгольське плато) внаслідок охолодження материка в зимовий період.

Вважається, що основна маса циклонів та антициклонів зароджується як результат динамічних факторів. Головним динамічним фактором є взаємодія теплового та холодного фронтів. Схеми проникнення теплового повітря у холодну атмосферу та навпаки представлені на рисунку 3.4 а, б.

Теплий фронт має нахил роздільної поверхні $1/100$. При наближенні цього фронту відбувається поступове підняття теплового повітря. При цьому в нижній частині клину утворюються купово-дощові хмари (КДХ), що дають опади. По мірі віддалення від вершини клину вгору на висоті 8-10 км утворюються перисті хмари (ПХ) та перисто-шаруваті хмари (ПШХ), які є провісниками наближення теплового фронту. Роздільна поверхня холодного фронту має нахил приблизно $1/50$. Попереду холодного фронту формуються купчасті хмари (КХ) та шарувато-дощові хмари (ШДХ) з активним утворенням опадів.

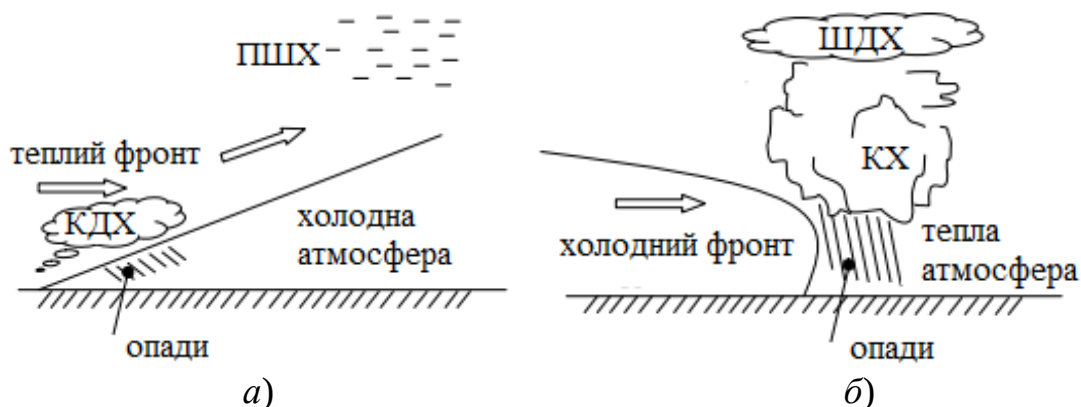


Рисунок 3.4 Схеми проникнення повітряних течій в атмосферу:

а – вторгнення теплої течії в холодну атмосферу;

б – вторгнення холодної течії у тепле середовище

Зародження та розвиток циклону представлено на рисунку 3.5

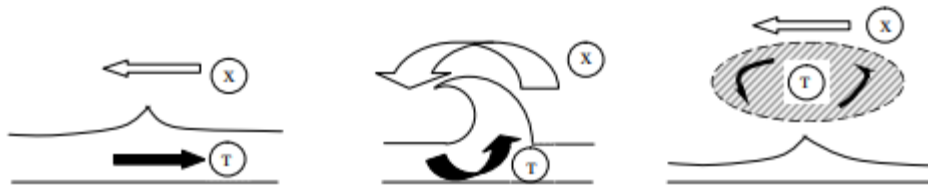


Рисунок 3.5 Схема формування циклону у північній півкулі:
(х – холодне повітря, т – тепле)

3.2 Види та різновиди вітрів

Вітер – це трохи таємнича сила природи, що не піддається контролю. Невеликий подих може раптово змінюватися сильним поривом і перетворюватися в ураган, що змітає на своєму шляху все. Існують різні типи, види та різновиди вітрів.

Класична класифікація руху – це шкала Бофорта, що представляє основні типи вітрів:

- 0 – штиль (відсутність вітру);
- від 1 до 3 – слабкий (швидкість 2 - 5 м/с);
- від 4 до 5 – помірний (5-10 м/с);
- від 6 до 8 – сильний (10 - 18 м/с);
- від 9 до 11 – шторм (18 - 30 м/с).
- від 12 – справжній ураган (понад 30 м/с).

Основні види

Вітри поділяються на *постійні* і *сезонні*.

Постійними називаються вітри, що рухаються в одному і тому ж напрямку.

До них відносять:

- пасати, що дмуть в тропічних умовах;
- західні (переносять повітряні маси в помірному кліматі);
- від полярних областей до помірних.

Сезонні потоки, відповідно, мінливі, в залежності від пори року. Що стосується місцевих потоків, то вони циркулюють на певній території і сильно впливають на місцевий клімат.

Пасати являють собою тропічні повітряні потоки, які дують у напрямку до екватора.

Західний вітер присутній весь час і зберігає своє домінування в помірному кліматі і прямує на схід.

Сезонні вітри змінюють свій напрямок. Взимку вони рухаються від поверхні Землі до океану, а влітку – змінюють напрямок на прямо протилежне. Беруть початок біля берегів Азії на Сході і південному сході.

Існуючі назви вітрів:

Бриз – теплі, ласкаві вітри. Частота їх мінливості становить 2 рази за добу. І спостерігаються на кордоні моря і землі. Вдень це освіжаючі вітри, які несуть свіжість простору моря. Вночі вони забирають все нагріте повітря з берега. Можуть виникати на озерах і водосховищах.

Сіроко – це красива назва родом з італійської мови. Позначає Південний або південно-західний вітер, який дме на півночі Африки і над Середземномор'ям.

Зефір – романтичний, по весняно-літньому легкий вітерець утворюється на східному Середземномор'ї.

Бора – в залежності від пори року потік стає або теплим, або холодним. Він формується в самій підставі з'єднання гір і морів. Особливо високу швидкість розвиває при спуску з гір у напрямку до води.

Фен – гарячий, сухуватий потік, який відрізняється поривчастими подихами і спускається з гірських вершин в долини. Присутній на Євразійській, північноамериканській території. Пориви виникають унаслідок сильних змін у висотах на абсолютно скромних дистанціях руху.

Самум – повітряний потік характерний для пустель. Сухий вітер з легкістю і на стрімкій швидкості піднімає вгору неймовірно величезна кількість піску. Присутній в африканських пустелях і на Аравійському півострові.

Суховій – гаряче і сухе повітря, що утворюється над пустелями і степами помірного кліматичного поясу.

Зюйд – рухається у напрямку на південь. Відрізняється постійною спрямованістю на Північному полюсі.

Є також вітер під назвою Нордер. Він йде на північ і бере початок в Мексиканській затоці.

Незвичайні різновиди:

Хабуб – північноафриканська буря на території Аравії і півночі Африки.

Солано – сухий, неприємний вітер, що піднімає пил. Чинить негативний вплив на людський організм. Утворюється над сонячною Іспанією і Гібралтаром.

Хамсін – гарячий шторм, що дме в Аравії протягом 50-ти діб.

Торнадо – справжнісінький, руйнівний ураган Північної Америки. Він являє собою воронку, яка буквально починається з хмар і опускається на поверхню землі. Швидкість його обертання величезна, і тому він дуже небезпечний, оскільки призводить до масштабних руйнувань. Друга назва – смерч. Крім Північної Америки, практично ніде не спостерігається.

Каліма – ця пилова буря рухається прямо до Канарських островів. Спрямованість на північний схід.

Байамос – справжній шквал, який зачіпає весь Малайський архіпелаг, Карибські острови і всього басейну. Супроводжується сильними грозовими проливними дощами.

Бліззард – Канадський буран, за аналогією з сибірською пургою.

Джут – холодне повітря, спрямований в Середню Азію з Сибіру. Неприємне явище, що несе з собою бурани, морози.

Леунг – холодна течія повітря над китайським узбережжям.

Нагаї – холодний, вогкий вітер з півночі, що дме на острови Японії.

Містраль – потужний, з високою швидкістю потік холодного і сухого вітру. Він з'являється на самому початку зими, а також ранньою весною з полярної території, яка проходить по французькій території.

Цікаві факти:

В історії був зафіксований найсильніший і швидкий Вітер в 1996 році, швидкість якого склала 113 м/с.

15 червня відзначають Міжнародний день вітру.

Є дуже дивні назви вітрів, в існування яких складно повірити. Однак вони є. Наприклад, *кавуновий* (дме на Егейський півострів), *доктор* (зовсім легкий літній бриз).

Ілюмінатор – слабкий подув вітру, просто збиває морську хвилю, роблячи морську поверхню гладкою і блискучою, назвали його або білий шквал.

3.3 Характеристики вітрового потоку

Характеристики вітрового потоку визначаються такими поняттями, як середньорічна швидкість V_{cp} , частота повторення швидкостей вітру $f(V)$, роза вітрів та іншими. V_{cp} визначається співвідношенням:

$$V_{cp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n V_i, \quad (3.1)$$

де n – число замірів, V_i – значення швидкості при i -тому замірі. Кількість вимірів на рік зазвичай розбивають на кілька стадій: спочатку заміряють середньогодинну, потім середньодобову та середньорічну швидкість. Заміри зазвичай проводяться на метеостанціях. Стандартна висота для виміру – 10 м (висота флюгера). При розрахунках поширення забруднень зазвичай приймають значення швидкості вітру, що реалізується в процесі руху забруднювача від відповідного джерела. У більшості випадків цей процес вважається *квазістаціонарним*. Це допускається у випадках, коли час переміщення забруднювача від джерела до рецептора буде істотно меншим за час зміни швидкості вітру. При вимірах швидкості зазвичай нехтують високочастотними флуктуаціями їх у цій точці. Частота повторення швидкостей $f(V)$ у заданому пункті території характеризує відносний час перебування швидкості в діапазоні V та $V + \Delta V$ за фіксований проміжок часу, наприклад, за рік. Іншими словами, $f(V)$ є щільність ймовірності, або

ймовірність перебування швидкості вітру у зазначеному проміжку протягом року. Загальний вид залежності $f(V)$ представлений на рисунку 3.6.

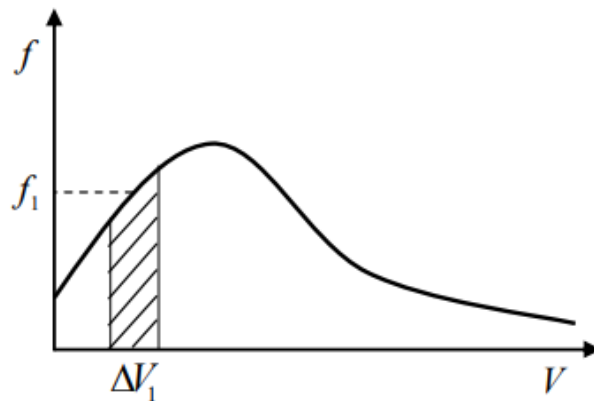


Рисунок 3.6 Загальний вигляд функції повторення швидкостей вітру

Площа під кривою $f(V)$ дорівнює одиниці і відображає той факт, що можливість перебування швидкості вітру в усьому діапазоні дорівнює одиниці. Функція $f(V)$ має розмірність [с/м].

Зміна швидкості вітру V залежно від висоти z описується степеневим або логарифмічним співвідношеннями (3.2) – (3.3).

$$\frac{V}{V_1} = \left(\frac{z}{z_1} \right)^m, \quad (3.2)$$

$$\frac{V}{V_1} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_1/z_0)}, \quad (3.3)$$

де z_0 – параметр шорсткості поверхні; V_1 – швидкість вітру висоти z_1 ; m – показник ступеня, який залежить в основному від стану стійкості атмосфери та деяких інших її параметрів, його середнє значення дорівнює 0,2. Влітку приймають $m \approx 0,24$, а взимку $m \approx 0,17$. Цей показник зростає зі збільшенням висоти (у 1,5 рази більше на висоті 100 м порівняно з висотою флюгера 10 м). Він залежить від рівня стійкості атмосфери.

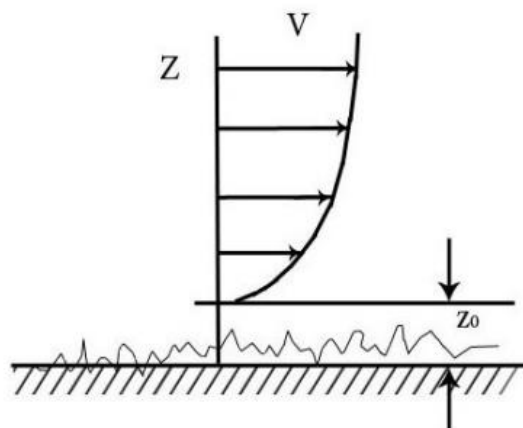


Рисунок 3.7 Профіль швидкості вітру V в залежності від висоти z

Параметр шорсткості z_0 приблизно визначає висоту над поверхнею, де швидкість вітру можна прийняти рівною нулю (рис. 3.7).

Значення z_0 істотно залежать від типу підстильної поверхні. У таблиці 3.1 наведено значення z_0 для різних типів поверхні.

Таблиця 3.1

Значення параметра шорсткості z_0 залежно від типу підстильної поверхні

Тип поверхні	z_0
пісок	0,01÷0,1
сніговий покрив	0,1÷0,6
скошена трава (0,01 м)	0,1÷1
низька трава	1÷4
зоране поле	2÷3
висока трава	4÷10
карликові рослини	10÷30
дрібнолісся (висота дерева ~ 15 м)	90÷100
передмістя із середньою забудовою	20÷40
міста із суцільною забудовою	80÷120
центри великих міст	200÷300

Роза вітрів – це графічне зображення певних характеристик вітру залежно від напрямку (рис. 3.8).

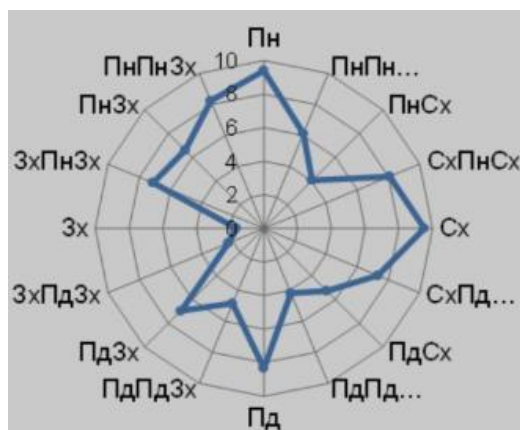


Рисунок 3.8 Роза вітрів

Довжина відрізка в заданому напрямку пропорційна значенню певної характеристики вітру (середня швидкість, відносна тривалість вітрового потоку в даному напрямку). Залежно від практичних цілей в аналізах вітрового потоку використовують і інші характеристики, наприклад: ймовірність появи штилів, ймовірність появи швидкостей вище заданого значення, спектри пульсацій у турбулентному вітровому потоці тощо. Метеорологи, наприклад, вивчають подібні характеристики для передбачення погоди, будівельники – для оцінки впливу вітру на будівлі та споруди, енергетики вивчають характеристики вітру при створенні вітродвигунів, фахівці в сфері захисту навколишнього середовища для прогнозування рівня забруднення атмосферного повітря шкідливими домішками.

3.4 Питання для самоконтролю

1. Як утворюються потужні вітрові системи?
2. Як відбувається утворення теплого вітру – *фену*?
3. За яких умов утворюються *бори*?
4. Як утворюються течії вихрового типу?
5. Які існують види та різновиди вітрів?
6. Охарактеризувати вітровий потік *самум*?
7. Що таке середньорічна швидкість?
8. Який процес називається *квазістаціонарним*?
9. Якими співвідношеннями описується зміна швидкості? Від чого залежить параметр шорсткості?
10. Що таке роза вітрів та як створюється графічне зображення?

3.5 Тестові завдання Тест 3. Вітрові системи

1. Де утворюються потужні вітрові системи?
 - а) на межі суші та океанів ☐;
 - б) на межі різних частин суші ☐;
 - в) на межі океанів ☐;
 - г) жодна відповідь невірна ☐.
2. Порівнюючи теплоємність океанських вод та материків, яка відповідь правильна?
 - а) океанські води та материки мають однакову теплоємність ☐;
 - б) океанські води та материки мають різну теплоємність ☐;
 - в) порівняти неможливо ☐;
 - г) жодна відповідь невірна ☐.
3. Яке твердження вірне?
 - а) вода нагрівається і остиває так само, як тверда речовина суші ☐;
 - б) вода нагрівається і остиває швидше, ніж тверда речовина суші ☐;
 - в) вода нагрівається і остиває повільніше, ніж тверда речовина суші ☐;
 - г) жодна відповідь невірна ☐.
4. Чому влітку виникає циркуляційний осередок із приземним вітром, який спрямований із моря у бік суші?
 - а) влітку материк тепліший за океан ☐;
 - б) влітку материк холодніший за океан ☐.

- в) влітку материк і океан однакової температури ☐;
- г) жодна відповідь невірна ☐.
5. Чому взимку циркуляційний потік спрямований з суші на море?
- а) взимку материк зберігає тепло довше і є теплішим за океан ☐;
- б) взимку океан зберігає тепло довше і є теплішим за материк ☐;
- в) взимку материк і океан однакової температури ☐;
- г) жодна відповідь невірна ☐.
6. За шкалою Бофорта, який вітер називається *помірним*?
- а) 2-5 м/с; ☐;
- б) 5-10 м/с; ☐;
- в) 10-18 м/с; ☐;
- г) 18-30 м/с ☐.
7. За шкалою Бофорта, який вітер називається *сильним*?
- а) 2-5 м/с; ☐;
- б) 5-10 м/с; ☐;
- в) 10-18 м/с; ☐;
- г) 18-30 м/с ☐.
8. Яке визначення *мусонів*?
- а) вітер, що дує між тропіками цілий рік, в північній півкулі з північно-східного, в південній з південно-східного напрямку, відділяючись один від одного безвітряною смугою; ☐;
- б) формується в самому підніжжі з'єднання гір і морів, особливо високу швидкість розвиває при спуску з гір у напрямку до води; ☐;
- в) вітри невеликої сили на берегах морів, великих озер і річок, мають добову періодичність: вдень вони дують з водної поверхні на суходіл, вночі навпаки; ☐;
- г) стійкі вітри нижнього шару тропосфери, що протилежно змінюють свій напрямок двічі на рік. Зимовий мусон має напрямок з суходолу на море, літній з моря на суходіл. ☐.
9. Яке визначення *пасатів*?
- а) вітер, що дує між тропіками цілий рік, в північній півкулі з північно-східного, в південній з південно-східного напрямку, відділяючись один від одного безвітряною смугою; ☐;
- б) формується в самому підніжжі з'єднання гір і морів, особливо високу швидкість розвиває при спуску з гір у напрямку

до води;

в) вітри невеликої сили на берегах морів, великих озер і річок, ☐;
мають добову періодичність: вдень вони дують з водної поверхні на суходіл, вночі навпаки;

г) стійкі вітри нижнього шару тропосфери, що протилежно ☐
змінюють свій напрямок двічі на рік. Зимовий мусон має напрямок з суходолу на море, літній з моря на суходіл.

10. Яке визначення *бризу*?

а) вітер, що дує між тропіками цілий рік, в північній півкулі з ☐
північно-східного, в південній з південно-східного напрямку, відділяючись один від одного безвітряною смугою;

б) формується в самому підніжжі з'єднання гір і морів, ☐
особливо високу швидкість розвиває при спуску з гір у напрямку до води;

в) вітри невеликої сили на берегах морів, великих озер і річок, ☐
мають добову періодичність: вдень вони дують з водної поверхні на суходіл, вночі навпаки;

г) стійкі вітри нижнього шару тропосфери, що протилежно ☐
змінюють свій напрямок двічі на рік. Зимовий мусон має напрямок з суходолу на море, літній з моря на суходіл.

11. Яке визначення *бора*?

а) вітер, що дує між тропіками цілий рік, в північній півкулі з ☐
північно-східного, в південній з південно-східного напрямку, відділяючись один від одного безвітряною смугою;

б) формується в самому підніжжі з'єднання гір і морів, ☐
особливо високу швидкість розвиває при спуску з гір у напрямку до води;

в) вітри невеликої сили на берегах морів, великих озер і річок, ☐
мають добову періодичність: вдень вони дують з водної поверхні на суходіл, вночі навпаки;

г) стійкі вітри нижнього шару тропосфери, що протилежно ☐
змінюють свій напрямок двічі на рік. Зимовий мусон має напрямок з суходолу на море, літній з моря на суходіл.

12. Вказати формулу для середньорічної швидкості V_{cp} ?

а) $V_{cp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n V_i$ ☐

$$\text{б) } V_{cp} = \sum_{i=1}^n V_i \quad \square;$$

$$\text{в) } V_{cp} = \sum_{i=1}^6 V_i \quad \square;$$

$$\text{г) } V_{cp} = \sum_{i=1}^{10} V_i \quad \square.$$

13. Який процес вважається квазістаціонарним?

- а) час переміщення забруднювача від джерела до рецептора ☐;
буде істотно більшим за час зміни швидкість вітру
- б) час переміщення забруднювача від джерела до рецептора ☐;
буде істотно меншим за час зміни швидкість вітру
- в) час переміщення забруднювача від джерела до рецептора ☐;
істотно не відрізняється за час зміни швидкість вітру
- г) жодна відповідь невірна ☐.

14. Від чого залежить параметр шорсткості?

- а) від висоти ☐;
- б) від тиску ☐;
- в) від температури ☐;
- г) від типу підстильної поверхні ☐.

15. Що таке роза вітрів?

- а) векторна діаграма, що характеризує режим вітру в даному ☐;
місці за певний період
- б) стовбчаста діаграма, що характеризує режим вітру в даному ☐;
місці за певний період
- в) лінійна діаграма, що характеризує режим вітру в даному ☐;
місці за певний період
- г) жодна відповідь невірна ☐.

4. Основні забруднюючі речовини

Мета: ознайомити з основами забруднюючими речовинами, їх походженням та класифікацією

Більшість шкідливих інгредієнтів виникають і потрапляють у атмосферу внаслідок горіння.

4.1 Походження та класифікація забруднюючих речовин

Вуглець, сірка, водень, азот у чистому вигляді або у складі сполук при горінні окислюються і тому в теплових викидах є переважна кількість саме

таких шкідливих речовин. Окис водню H_2O , тобто пари води, і двоокис вуглецю CO_2 (вуглекислий газ) присутні в атмосфері, як природні компоненти і тому не віднесені до категорії забруднювачів, незважаючи на те, що концентрація CO_2 впливає на навколишнє середовище у глобальному вимірі і цей вплив аналізується з погляду кліматології. В той же час, *недоокислений вуглець* (CO), *оксиди сірки та азоту* є основними забруднювачами в процесах горіння. При взаємодії викидів між собою, з атмосферним повітрям і водяною парою з'являються нові шкідливі інгредієнти, які слід враховувати у процесі аналізу екологічного стану довкілля.

Якщо розглядати не лише горіння, а й широкий клас технологічних процесів, при яких мають місце хімічні реакції та фізичні перетворення, то кількість шкідливих інгредієнтів зростає в десятки разів. Крім того, слід мати на увазі, що шкідливі речовини створюються у значних кількостях не тільки антропогенним шляхом, але також внаслідок природних явищ: виверження вулканів, лісових пожеж, сонячної радіації і т. п.

Існує кілька способів класифікації речовин, що забруднюють довкілля. З цієї точки зору шкідливі речовини поділяють на: *алергени, мутагени, канцерогени, отруйні речовини, а також інгредієнти радіоактивного та комплексного впливу.*

За хімічним складом вони також можуть бути поділені на кілька груп: *сполуки сірки* (сірчана кислота, оксиди сірки, сірководень і т. п.), *сполуки азоту* (азотна кислота, аміак, нітрати, ціаніди, аміни, що розчиняють і розбавляють сполуки, оксиди тощо), *галогени та їх сполуки* (хлор, фтор, бром, фтороводень, ДДТ, хлороформ, хлорбензол тощо), *сполуки вуглецю* (окис вуглецю, вуглеводневі: бензол, толуол, метанол, етанол, фенол, альдегіди тощо), метали та їх сполуки (свинець, ртуть, тетраетилсвинець), *сполуки, які виникають при фотохімічному синтезі та вільні радикали.*

Розглянемо дію основних речовин, що забруднюють атмосферу, на навколишнє середовище, людину та інші живі істоти. При цьому матимемо на увазі те, що результат такої дії залежить від двох параметрів: *концентрації речовини в повітрі* (її ми виражатимемо в mg/m^3 за нормальних умов, тобто за $t=15^\circ C$, $p=760$ мм рт. ст.), а також періоду експозиції у годинах.

Рівень шкідливого впливу поллютантів на людину можна оцінити на основі експериментально встановлених норм або значень гранично допустимої концентрації (ГДК).

ГДК – це максимально допустима концентрація шкідливої речовини в навколишньому середовищі (в атмосфері, у воді і т. п.), яка при заданому часі впливу на людину ще не викликає тимчасового або стійкого порушення його життєдіяльності. Перелік окремих шкідливих речовин із зазначенням їх гранично допустимої концентрації наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Значення гранично допустимої концентрації для деяких поллютантів

Речовина	ГДК, максимально разова, мг/м ³	ГДК, середньодобова, мг/м ³
Азоту діоксид	0,085	0,04
Азоту оксид (II)	0,4	0,06
Азотна кислота	0,4	0,15
Аміак	0,2	0,04
Озон	0,16	0,03
Оксид вуглецю	5	3
Сажа	0,15	0,05
Сірчана кислота	0,3	0,1
Сірководень	0,008	-
Сірковуглець	0,03	0,005
Сірки діоксид	0,5	0,05

4.2 Оксиди та вуглеводні

Оксис вуглецю (чадний газ). Хімічна формула – CO , атомна вага – 28, газ без кольору та запаху. Виникає у процесі окислення вуглецю при горінні. Одним із основних джерел CO у містах є автомобільний транспорт. Щорічні світові викиди окису вуглецю в атмосферу оцінюються в обсязі 200÷250 млн. т., з них 80 % припадає на пересувні джерела. Викиди окису вуглецю в півтора рази перевищують сумарні (тобто разом узяті) викиди оксидів сірки, азоту та вуглеводів.

Відомо, що у США, Західній Європі, Японії та інших країнах з високим рівнем промислового виробництва спостерігається дуже висока концентрація автомобілів на міських магістралях. У зв'язку з цим, концентрація CO у великих містах значно перевищує допустимі норми.

Фахівці відносять окис вуглецю до категорії токсинів (отрут). Дослідженнями встановлено, що при концентрації $\phi=50\div60$ мг/м³ і експозиції $T=8\div10$ годин з'являються ознаки отруєння: головний біль, втрата свідомості, погіршення психомоторних функцій, погіршення здатності приймати інтервали часу тощо. Втрата свідомості настає при $\phi=250$ мг/м³, а при $\phi=750$ мг/м³ є смертельною дозою. Найбільша небезпека отруєння є для водіїв автомобілів і тих, хто тривалий час знаходиться поблизу автотрас, а також осіб, які перебувають у погано вентильованих приміщеннях з пічним опаленням.

Фізіологія отруєння пояснюється тим, що CO замінює кисень, яким повинен насичуватися гемоглобін крові, і в організмі настає кисневе голодування. Дія окису вуглецю на рослини та матеріали (дерево, метали) до особливих змін не призводить. В атмосфері CO зберігається досить довго: від кількох днів до кількох місяців.

Оксиди сірки. Хімічні формули SO_2 та SO_3 . Двоокис сірки – негорючий газ без кольору з різким запахом дратівливим (при $\phi>3,5$ мг/м³). Його молекулярна

вага 64. Ця забруднювальна речовина вивчалася найінтенсивніше. У фотохімічних та каталітичних процесах переходить у SO_3 . Основна загроза – утворення сірчаної кислоти при взаємодії з парами води. Вже при малих середньодобових концентраціях, тобто при $\varphi \geq 0,2 \text{ мг/м}^3$ з'являються респіраторні симптоми, а при $\varphi \geq 0,55 \text{ мг/м}^3$ настає важке отруєння. Особливо небезпечні оксиди сірки для дітей та людей похилого віку. Основним джерелом оксидів сірки є деякі сорти вугілля, які виділяють їх при згорянні, а також деякі технологічні процеси. Пари сірчаної кислоти, які виникають у вологому повітрі, є активними окиснювачами металів, породжують так звані кислотні дощі, які негативно впливають на рослинність.

Окису азоту. Азот у сполуках з киснем створює шість оксидів, загальна хімічна формула яких має вигляд N_xO_y . Найбільш поширеними при викидах в атмосферу є окис NO і двоокис NO_2 . Оскільки азот і кисень присутні в атмосфері як її основні компоненти (азот відноситься до інертних газів), то виникнення оксидів обумовлено досить високими температурами, які виникають при згорянні інших з'єднань. Окис азоту N_2O_4 це газ жовто-бурого кольору, який є активним окиснювачем. Подібно до оксидів сірки окису азоту стають особливо небезпечними при взаємодії з парами води та при утворенні азотної кислоти. При вдиху повітря, перенасиченого окислами азоту вже при $\varphi \geq 0,015 \text{ мг/м}^3$ настає роздратування дихальних органів, особливо у 2÷3 – літніх дітей. При великих концентраціях з'являються спазми грудної клітки та сильний кашель.

Вуглеводні. Таким терміном позначено великий клас сполук, які мають загальну формулу C_nH_m (наприклад, метан, етан, пропан і інші). Виникають вони природним шляхом, в більшості випадків поряд з нафтовими вугільними родовищами. В атмосфері з'являються також недоокиси при горінні інших вуглеводів і за деяких хімічних реакціях. Вуглеводні є основою паливних сполук, наприклад, бензину. Небезпечними для людей є лише їх значні концентрації, наприклад, у вугільних шахтах, у побутових умовах тощо. Крім того, небезпека має місце при фотохімічних реакціях цих сполук з іншими речовинами в атмосфері, коли виникає фотохімічний смог.

4.3 Продукти фотохімічних реакцій та пилові забруднення

При взаємодії сонячної радіації з хімічними елементами, що знаходяться в атмосфері, мають місце складні реакції, що призводять до виникнення нових шкідливих речовин – оксидантів, вільних радикалів та інших. В даний час такі речовини майже не контролюються екологічними службами, оскільки вони не є прямими викидами, а виникають на наступних стадіях еволюції шкідливих речовин. У більшості випадків для них навіть не затверджено норми, тобто максимально допустимі концентрації.

Водночас, як показала практика, у великих містах саме фотохімічні смоги різного типу становлять саму велику небезпеку здоров'ю населення. Для ініціювання фотохімічних реакцій у повітряне середовище має надходити значна кількість енергії. Джерелом такої енергії є сонячна радіація. Найбільша кількість енергії надходить в атмосферу в ультрафіолетовому діапазоні, коли енергія фотонів становить $290\div 580$ кДж/моль. Першим кроком у цьому процесі є фотохімічна дисоціація (розпад молекул на складові елементи), а потім виникає цілий ланцюжок послідовних реакцій. При цьому, перш за все виникає озон O_3 , який є потужним оксидантом і відноситься до категорії отруйних речовин. Озон взаємодіє з вуглеводнями C_nH_m і при цьому виникають, так звані, *вільні радикали* R , RO , HCO , ROO , а також *альдегіди* та деякі інші речовини, такі як *пероаксіяцилнітрат (ПАН)*, *пероксибензоїлнітрат (ПБН)*. Дві останні речовини шкідливо впливають на слизову оболонку, викликають її подразнення. Вважається, що вони є активними канцерогенами, викликають порушення зору та інші патологічні явища. Збільшення інтенсивності руху в наших містах (в Дніпрі в тому числі) є передмовою виникнення фотохімічних смогів та критичного погіршення екологічного стану.

Пилові викиди. Відомо, що пилові викиди, тобто викиди твердих частинок, надходять в атмосферу від різних джерел, які можна поділити на дві групи: антропогенні та природні. Загальна маса антропогенних викидів в даний час становить більше 30 млн. т. на рік, з яких 53 % обумовлено промисловими технологічними процесами, 21,5 % – промисловими та побутовими котельнями, близько 13 % – тепловими електростанціями, 9,5 % – знищенням сміття, 3 % – роботою автотранспорту. Природні викиди включають вулканічний попіл, морську сіль, продукти лісових пожеж та вітрової ерозії, пилок та насіння рослин та ін. Загалом кількість частинок, що надходять в атмосферу, в середньому становить близько 10 % загальної маси викидів антропогенного характеру. В індустріалізованих країнах, а тим більше на території великих міст, частка подібних викидів істотно вища. Так, наприклад, в Україні вона становить близько 15 %, у Дніпрі – 24 %. Хоча цей показник, як видно, загалом не перевищує 25 % від загального обсягу викидів, тим не менш потенційний збиток від даного виду забруднень дуже значний.

Насамперед, запиленість атмосфери впливає на працездатність та стан здоров'я людини. Найбільш небезпечними вважаються частинки малого розміру (до 1 мкм), які не відокремлюються у носоглотці та верхніх дихальних шляхах, а надходять усередину дихального тракту. Якщо вони нерозчинні, то відбувається їх накопичення у легенях та у лімфатичних вузлах. Розчинні частинки також небезпечні, оскільки в рідкому стані шкідливі речовини розносяться по всьому організму. Велику небезпеку здоров'ю приносять частинки, що містять важкі метали або токсичні з'єднання. Природно, що найбільш чутливі до цього виду забруднень люди з бронхолегеневою та

серцево-судинною патологією. Як показує медична статистика, саме у великих містах із запиленою атмосферою такі види захворювань значно перевищують показники, характерні для сільської місцевості. Це легко зрозуміло, оскільки найзначніша частина джерел пилових викидів розташована на території великих міст та індустріальних центрів. Середньорічна концентрація твердих частинок в атмосфері та великих центрах перевищує 100 мкг/м^3 . При цьому тут спостерігається пряма кореляція між чисельністю населення та концентрацією частинок пилу.

В Україні найбільші викиди шкідливих речовин в атмосферу (включаючи і викиди пилу) спостерігаються в таких містах як Дніпро, Запоріжжя, Харків, Кривий Ріг, Кам'янське та інших. Рівень пилового забруднення істотно впливає практично на всі метео параметри міської атмосфери (температуру, вологість, рівень сонячної радіації, стійкість атмосфери, хімічний склад повітряного середовища, щільність хмарного покриву, частоту утворення туманів та випадання опадів тощо).

Дослідженнями встановлено, що над промисловими центрами зазвичай формується кілька пилових шарів: *нижній*, який залягає між домами та відкритими площами (пов'язаний з викидами автотранспорту, роботою приземного вітру та локальних вихорів); *проміжний* шар, що живиться димом опалювальних систем (на висоті 20...30 м) і верхній шар, що живиться димом високих промислових труб (на висоті 50÷100 м). Таке явище спостерігається за слабких вітрів. Збільшення швидкості вітру сприяє більш активному перемішуванню названих шарів і це необхідно враховувати в розрахунках. Окремі частинки пилу, будучи ядрами конденсації, сприяють утворенню більш частих туманів. Інші, так звані «леткі частинки», беруть участь в утворенні міського смогу. Запиленість атмосфери помітно знижує рівень сонячної радіації та впливає на характер «температурної інверсії» в атмосфері.

Розміри частинок пилу змінюються від 0,0002 мкм (трохи більше молекули) та до 500 мкм. Частинки розміром менше 0,1 мкм (тонко дисперсний пил) виявляють властивості молекул, їх рух хаотичний і визначається зіткненнями між молекулами. Частинки більше 20 мкм досить швидко видаляються з атмосфери внаслідок гравітаційного осідання. Частинки в діапазоні від 0,1 мкм до 20 мкм мають тенденцію слідувати потоку газу-носія і можуть істотно впливати на життєдіяльність людини.

Такий широкий діапазон розмірів аерозольних частинок призводить до ще більш істотних відмінностей для значення швидкостей осідання та відповідно часу їх перебування у повітрі. Цей фактор ускладнює завдання очищення газів, що відходять, оскільки один будь-який вид пиловловлюючого обладнання не може бути ефективним у всьому зазначеному інтервалі. Дані про ефективність уловлювання твердих частинок залежно від їх розміру наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Розподіл техногенних частинок за розмірами та ефективністю їх уловлювання

Інтервал розмірів, мкм	Середній розмір, мкм	Ваговий відсоток	Кумулятивний ваговий відсоток	Ефективність уловлювання, %
<0,5	0,25	0,1	0,1	8
0,5 – 1,5	1	0,4	0,5	30
1,5 – 2,5	2	9,5	10	47,5
2,5 – 3,5	3	20	30	60
3,5 – 4,5	4	20	50	68,5
4,5 – 5,5	5	15	65	75
5,5 – 6,5	6	11	76	81
6,5 – 7,5	7	8	84	86
7,5 – 8,5	8	5,5	89,5	89,5
8,5 – 11,5	10	5,5	95	95
11,5 – 16,5	14	4	99	98
16,5 – 23,5	20	0,8	99,8	99
>23,5		0,2	100	99+

Необхідно, однак, зауважити, що пил, що піднімається з землі під час руху транспорту та з приземним вітром, має інший склад. Інтенсивність надходження такого пилу в атмосферу та її гранулометричний склад менш вивчений, хоча саме для міських територій це було б важливо.

4.4 Діоксини. Радіонукліди. Іонізуюче випромінювання

Діоксини. Діоксини – це група хімічних сполук, токсичні властивості яких почали активно вивчати лише останні десятиліття. У цю групу включають поліхлоровані сполуки ароматичного ряду, а також поліхлоровані біфеніли (ПХБ), які є їхніми близькими родичами. Сюди ж примикають поліароматичні вуглеводні (ПАВ) – найсильніші токсиканти та канцерогени. Основу молекулярної структури діоксинів складають два шестичленні вуглецеві кільця (бензольні кільця), які пов'язані між собою одним або двома атомами кисню є мало токсичними сполуками. При заміщенні ж атомів водню хлором, токсичність речовини суттєво підвищується. Залежно від розміщення атомів хлору (при однаковій їх кількості) виходять так звані ізомери з однаковою сумарною формулою, але з різними властивостями. Так при введенні до складу бензольних кілець чотирьох атомів хлору виходить 22 діоксинові ізомери, з яких токсичним (причому найнебезпечнішим серед цих речовин) є ізомер 2,3,7,8 - тетрахлордібензо-пара-діоксин, чемпіон серед отрут. Його назву часто скорочують до абревіатури ТХДД, або 2378-ТХДД. У цілому нині розрізняють 75 діоксинів. До них примикають 135 фуранів та 209 поліхлорованих біфенілів (ПХБ) – всього 419 з'єднань. З них токсичні 7 діоксинів, 10 фуранів та 11 ПХБ. Рівень токсичності діоксинів та прилеглих до них речовин виражається

відповідно до міжнародної шкали факторів еквівалентної токсичності (1-TEF). Цей фактор дорівнює числу, яке показує рівень токсичності речовини в порівнянні з ТХДД (для нього 1-TEF дорівнює одиниці).

Оскільки діоксини, як правило, утворюються у вигляді сумішей різного типу, то загальний рівень токсичності визначається залежно від концентрації кожного з них. Враховуючи високу токсичність окремих діоксинів, відповідні державні органи різних держав встановили гранично допустимі норми їх надходження до організму людини. Ці норми залежать від фізичних властивостей діоксинів та характеру їх потрапляння в організм.

Основна частина діоксинів надходить в організм разом з їжею та частково через органи дихання. Діоксини добре розчиняються в жирах і накопичуються в жирових тканинах живих істот, в молоці тварин і в молоці матері, що годує. Нагромадження діоксинів відбувається протягом усього життєвого циклу, що може призвести до серйозних патологічних змін в організмі, включаючи і онкозахворювання. Як приклад, можна навести добові допустимі норми, прийняті у США та Європейському союзі. Ця норма дорівнює 6,4 фг (фемтограм) на 1 кг маси тіла людини (1фг = 10⁻¹⁵ г).

Для того, щоб оцінити цю норму можна показати, що протягом життя людина не повинна спожити більш ніж 0,00002 г діоксину!

Це говорить про високий рівень його токсичності. Наприклад, за нормам США діоксин ТХДД приблизно в мільйон разів токсичніше миш'яку. Діоксини потрапляють у довкілля переважно при згорянні пластикових предметів на сміттєспалювальних заводах, побутових звалищах (особлива небезпека виникає при неконтрольованому їх спалюванні в житловій зоні міст).

Діоксини містяться також у складі окремих пестицидів та інших отрут. Патологічні зміни у функціонуванні клітин спостерігаються вже при дуже низьких концентраціях цих речовин – у сотні і тисячі разів нижчих, ніж будь-якого з вивчених екологічних токсикантів. Світові засоби масової інформації мали рацію стосовно діоксинів, коли ввели в обіг термін «хімічний СНІД». Зрозуміло, що вивчення характеру поширення цих токсикантів в атмосфері є серйозною сучасною проблемою, що вимагає вирішення.

Радіонукліди. Іонізуюче випромінювання.

Під радіонуклідами або радіоактивними ізотопами розуміють речовини, здатні на трансформацію, що супроводжується іонізуючим випромінюванням. Радіонукліди поділяють на **природні та штучні**. Природні радіоактивні речовини утворюються в земній корі, водному середовищі та в атмосфері в процесі еволюції нашої планети, а також при дії сонячної радіації або при попаданні на Землю космічної речовини. Штучні речовини, серед яких є такі, які в природному середовищі зустрічаються і утворюються при атомних та термоядерних вибухах, а також у реакторах атомних станцій та в атомних двигунах кораблів та підводних човнів. У процесі іонізуючого випромінювання

відбувається розпад вихідної речовини та утворення нової. Радіоактивні промені або частинки поділяють на *три категорії*.

α-промені – це частинки, що складаються з двох нейтронів і двох протонів (протони заряджені позитивно). При взаємодії із зовнішньою речовиною α - промені, що мають велику енергію, збуджують цілий каскад молекул – до 100 тисяч пар іонів від однієї частинки. Таке збудження у живому організмі вважається «пошкодженням молекули». Після приєднання двох електронів α - частинки втрачають швидкість і перетворюються на нейтральні молекули гелію.

β-промені – це потік викинутих радіонуклідами електронів. При зіткненні з молекулами зовнішнього середовища β-промені також збуджують молекули та іонізують їх. Швидкість їхнього руху – майже 300 тис. км/с. (Зауважимо, що α - частинки рухаються повільніше). При гальмуванні вони приєднуються до будь-якої молекули та нейтралізуються.

γ-промені (γ-кванти, γ-фотони) – особливий характер випромінювання. Фізично вони являють собою електромагнітні хвилі високої частоти і малої довжини. Цим вони відрізняються від видимого світла. γ-промені мають велику кінетичну енергію і не мають електричного заряду. Вони зароджуються в процесі взаємної перебудови заряджених частинок у ядрах атомів. На відміну від світлових променів, вони не відбиваються від поверхні тіл, а проникають всередину, оскільки, більшість речовин і предметів для цих речовин є проникними. При русі всередині речовини γ-кванти вибивають електрони з орбіт і перетворюють молекули та атоми в заряджені іони. Відірвані електрони забирають у γ-квантів частину енергії і самі стають іонізуючими частинками. Іонізація молекул у тілах людей і живих істот якраз і є радіаційним ураженням, причому γ-кванти існують тільки в русі і нейтралізуються при повній втраті енергії. Як було зазначено, радіонукліди характеризуються різними типами та енергією випромінювання. Крім того, ознаками, що їх відрізняють є: кількість протонів у ядрі Z (заряд ядра); число нейтронів у ядрі N та атомне число A (загальна кількість частинок у ядрі). Ядра з однаковим Z і різними числами N називаються *ізотопами*. Нарешті, характерною ознакою радіонукліду є також період його напіврозпаду $T_{1/2}$. Екологічно небезпечними вважається близько 25 радіонуклідів з різними атомними числами, починаючи від легких (трій-3, вуглець-14, натрій-24, фосфор-32) і закінчуючи важкими (радон-222, радій-226, уран -238, плутоній-239, торій-232).

Сильним α-випромінюванням володіють тільки останні п'ять елементів. Інші випромінюють β-кванти або γ-промені. Період напіврозпаду радіонуклідів коливається від кількох секунд або годин, наприклад $T_{1/2}=2$ години (аргон-41), до мільярдів років, наприклад $T_{1/2}=13,9$ млрд. років (торій-232). Радіоактивний розпад у окремих випадках характеризується наявністю так званого

«радіоактивного ланцюжка» або ж розгалуженням. Зрештою цей процес закінчується утворенням стабільної речовини, що не ділиться.

Активність випромінювання радіонуклідів A визначається кількістю частинок N , що розпалися, в одиницю часу, тобто

$$\overline{A} = \frac{dN}{dt}. \quad (4.1)$$

Одиницею активності у системі СІ є Беккерель [Бк] (один розпад за секунду). Раніше для позначення активності використовувалося Кюрі [Ки], $1\text{Ки}=37\text{ млрд Бк}$.

При атомних вибухах утворюється значна кількість радіонуклідів, серед яких найбільш небезпечними є стронцій-90 з періодом напіврозпаду $T_{1/2}=27,7$ років та цезій-137 для якого $T_{1/2}=32$ роки. Крім того, в довкілля потрапляє частина речовин, що не прореагували, зокрема плутоній-239, для якого $T_{1/2}=24,4\cdot 10^3$ років. До речі, ця речовина небезпечна не тільки своєю радіоактивністю, а й хімічною токсичністю. Стронцій-90 і цезій-137 утворюються також в атомних реакторах, тому їх викиди у разі аварії є дуже небезпечними. Завдяки хімічній схожості з кальцієм, стронцій-90 проникає в кісткову тканину хребетних, а цезій-137 накопичується у м'язових тканинах.

Значну роль у формуванні обстановки у зоні, близькій до АЕС грають інертні радіоактивні гази (ІРГ): криптон (18 ізоотопів), ксенон (20 ізоотопів), йод (20 ізоотопів). Більша частина з них мають малий період напіврозпаду (менше 1 хвилини), проте інші накопичуються у серійних реакторах, це окремі ізоотопи криптону, ксенону та йоду.

У системі теплоносія крім продуктів поділу накопичуються радіонукліди іншого походження. Вони утворюються при активації теплоносія і міжреакційного повітряного простору. В цілому спектр радіонуклідів, що викидаються в атмосферу реакторами та іншими підприємствами ядерно-паливного циклу (видобуток, збагачення, транспортування, складування відпрацьованого матеріалу) дуже широкий та різноманітний. Радіонукліди можуть впливати на живі істоти шляхом зовнішнього опромінення, тобто через одяг, взуття і шкіру, та внутрішнього опромінення, тобто при попаданні в організм з їжею та у процесі дихання. Природно, що внутрішнє опромінення більш небезпечне, оскільки нукліди знаходяться всередині організму і перебувають там протягом тривалого часу. Рівень опромінення, чи так звана доза, D визначається як відношення поглиненої променевої енергії E до маси m речовини, яка її поглинула:

$$D = \frac{E}{m}, \quad (4.2)$$

[Дж/кг=Гр], де Гр. – скорочення від слова Грей. Залежно від отриманої дози у

людини та інших істот відбуваються порушення основ життєдіяльності. Малі дози знижують імунітет, уповільнюють ріст людини. У міру збільшення дози зменшується тривалість життя, настає стерилізація. При великих дозах відбуваються зміни генетично, і це проявляється у другому і наступних поколіннях. Подальше збільшення дози призводить до виникнення променевої хвороби або смертельного результату.

На жаль, людство не виробило хімічних або фізичних способів нейтралізації радіонуклідів. Єдині рекомендовані варіанти полягають у тому, щоб сховатися від опромінення за певним заслоном, відійти від джерела радіоактивності і не вживати в їжу уражені радіонуклідами продукти.

4.5 Біополютанти. Комбіновані забруднення

Біополютанти. Повітряне середовище великих міст містить цілий комплекс речовин, що надає шкідливий вплив на здоров'я людини. Дані про можливий вплив типових техногенних забруднень, таких як окис вуглецю, оксиди сірки та азоту, вуглеводні, аміак та інших, широко відомі та описані у відповідній літературі. У той же час, відомості про вплив на здоров'я частинок рослинного походження, що витають у повітрі (так звані біополютанти) і, зокрема, про характер їх поширення в атмосфері, досить обмежені. Найбільш поширеними біополютантами є пилок квітучих рослин і спори пліснявих грибів. Насамперед слід назвати такі рослини, як амброзія, полин, береза, сосна. До цієї ж категорії відносять деякі злакові, а також вільху, ліщину, тополь, в'яз, клен, дуб та інші рослини. Звичайний час утворення *пилу дерев – березень, квітень, травень; злаків та лугових трав – червень, липень; амброзії та полину – серпень, вересень.*

Досвід свідчить, що вдихання забрудненого біополютантами повітря може виявитися ще більш небезпечним, ніж вдихання промислових викидів. Справа в тому, що вплив технічних викидів може обмежитися хворобливою реакцією слизової оболонки та бронхів. У той час, як більшість біополютантів можуть призвести до ураження імунної системи на досить тривалий період і навіть перейти в хронічний перебіг. Природно, що міські жителі піддаються комплексному впливу *техногенних і біологічних полютантів*, що істотно ускладнює набуту патологію. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я щонайменше 30% населення Землі схильні до тих чи інших видів алергічних реакцій. При цьому відсоток міських жителів у 5÷6 разів більший в порівнянні з жителями сільської місцевості. Встановлено, що вплив біополютантів може викликати масові захворювання, епізоотії та інші фітопатогенні процеси. Основними симптомами захворювання є: *рідкий нежить, чхання, різь в очах і слезотеча.* Розвиток хвороби може призвести до більш серйозних наслідків, а саме: виникнення бронхіальної астми, появи серйозних

набряків, включаючи небезпечні набряки язика та глотки, а також *шкірні захворювання у вигляді червоних пухирів, що свербять* і т.п. Крім алергічних реакцій виникають і небезпеки іншого роду. Окремі види пилок можуть бути носіями радіонуклідів (наприклад, пилок сосни, що росте в зоні відчуження чорнобильської АЕС). Продуктивність сосни дуже висока і становить приблизно 500 кг/годину. Вітер може переносити такий пилок на відстані кілька сотень кілометрів. При цьому виникає додаткове екологічне навантаження на територію.

Вивченням даної проблеми активно займаються медики алергологи і певною мірою біологи, наприклад, фахівці з Інституту ботаніки НАН України. Набагато меншою мірою в її вивченні залучені фахівці, які займаються вивченням процесів перенесення біочастинок у повітряному середовищі. Слабо розроблено математичний апарат, що моделює даний процес.

В окремих країнах накопичено досить великий експериментальний матеріал, отриманий на основі природних вимірів концентрації біополютантів в атмосфері. З цією метою створюються спеціальні біостанції. Наприклад, у США функціонує 90 таких станцій, в Італії – 91, у Німеччині – 80, в Іспанії – 50. На жаль, в Україні є лише одна така станція. Поки що немає ще загальновизнаних показників рівня шкідливості біополютантів в залежності від їхньої концентрації. Осереднені дані щодо прийнятих у різних країнах рівнях шкідливості виглядають так, як показано в таблиці 4.3 (надалі біочастинка буде позначена індексом ВР - від англійського терміна "bioparticle"). Концентрація задається кількістю біочастинок в 1 м³, тобто [ВР/м³].

Таблиця 4.3

Рівні шкідливості концентрації біочастинок

Рівень шкідливості	Низький	Середній	Високий	Дуже високий
Число частинок	< 30	30÷49	50÷149	> 150

Патологічні реакції у людей починаються при рівні забруднення 10÷30 ВР/м³, потім ускладнюються в міру зростання концентрації і стають дуже небезпечними при рівні 150÷200 ВР/м³ і більше.

Комбіновані забруднення. Під комбінованим забрудненням розуміють наявність у повітряному середовищі кількох шкідливих речовин, які відрізняються одна від одної хімічним складом, фізичними властивостями або своїм походженням.

Хімічний склад речовини, як відомо, позначається відповідними формулами, наприклад, CO, H₂S, N₂O₄, NH₃OH, H₂SO₄ тощо. Іноді за цією ознакою розглядають окремі сукупності (групи) речовин, що відзначаються подібною структурою або властивостями, наприклад: діоксини, кислоти,

альдегіди, поліхлоровані біфеноли, вуглеводні і т. п. Хімічний склад окремих інгредієнтів, які визначаються єдиним терміном, може бути досить складним. Наприклад, така речовина, як бензин, має у своєму складі кілька компонентів: парафіни (до 58 %), олефіни (до 22 %) та ароматичні сполуки (до 25 %). У той же час, умовна формула бензину може бути записана досить просто – C_7H_8 . Як приклад, можна також відзначити, що досить складний хімічний склад мають шкідливі сполуки, об'єднані єдиною назвою повітряні смоги.

Хімічний склад речовин визначає їх здатність вступати за певних умов у реакцію з іншими речовинами. У процесі таких реакцій можуть утворюватися нові шкідливі інгредієнти, які входять, наприклад, до складу названого вище повітряного смогу та інших складних сполук.

У деяких випадках у процесі реакції відбувається нейтралізація шкідливих речовин. Під час опадів окремі речовини розчиняються у воді, що призводить до виникнення кислотних дощів та інших негативних явищ.

Фізичні властивості шкідливих речовин визначаються, перш за все, їх *агрегатним станом*, тобто вони можуть бути в атмосфері у твердому стані (пил, сажа, рослинний пилок), рідкому стані (краплі, тумани) та газоподібному стані (включаючи пару окремих рідин). Досить часто для перших двох категорій використовують загальний термін – аерозолі.

Іншою фізичною властивістю є *здатність речовин до мимовільної трансформації*, яка супроводжується іонізуючим випромінюванням. Такі шкідливі речовини називаються *радіонуклідами*. У процесі подібної трансформації можуть виникати α -промені, β -промені та γ -промені, які відрізняються своєю структурою, рівнем енергії та відповідним впливом на людей і живі організми.

Важливою фізичною характеристикою є *питома вага* твердих частинок (точніше кажучи, рівень їх плавучості в атмосфері). Така властивість істотно впливає на характер їх міграцій у повітряному середовищі. Можна, наприклад, назвати пилок окремих рослин, якому властива висока плавучість. Відомо, що радіоактивний пилок сосен, що знаходяться в Чорнобильській зоні відчуження може поширюватися під дією вітру на відстань у кілька сотень кілометрів. З іншого боку, висока питома вага окремих частинок сприяє тому, що вони досить швидко осідають на поверхні землі і не поширюються на великі відстані.

За *ознакою походження* шкідливих речовин джерела їх викидів можна поділити на *природні та антропогенні*. Значна частина сполук природного походження потрапляє в атмосферу під час виверження вулканів. Обсяг викидів у таких випадках можуть бути досить значними, а продукти викидів поширюються іноді на тисячі кілометрів. Іншими причинами природних викидів можуть бути *лісові або степові пожеги*. Пилові бурі можуть піднімати в атмосферу тисячі тон пилу, переносити їх на значні відстані. Нарешті, природне походження мають так звані біополютанти і рослинний пилок,

рослинні фрагменти (наприклад, тополиний пух), спори окремих видів грибів, шкідливі бактерії тощо.

Шкідливі речовини антропогенного походження становлять основну частину забруднень, особливо на міській території. Насамперед, це викиди промислових підприємств – хімічних, металургійних, будівельних, машинобудівних та інших. Далі йдуть джерела, що рухаються – автомобільні, авіаційні та інші види транспорту.

Значний внесок у забруднення повітря роблять комунальні підприємства, які виконують функції теплопостачання чи ліквідації (спалювання, чи переробки) сміття тощо, деяка частина шкідливих викидів надходить від домоволодінь, міського житла при опаленні, приготування їжі.

Коли йдеться про комбіноване забруднення навколишнього середовища, необхідно мати на увазі не тільки шкідливі викиди, а й деякі фізичні явища.

Насамперед це електромагнітне випромінювання (ЕМВ), яке надходить у простір від станцій зв'язку (у кожному великому місті їх десятки тисяч) телевізійних та радіо трансляційних веж, а також лінії електропередач високої напруги. Вже зараз інтенсивність ЕМВ у багатьох містах перевищує допустимі норми у кілька разів.

Сюди слід додати іонізуюче, рентгенівське та лазерне випромінювання, шумове та вібраційне забруднення, ультразвукові та інфрачервоні хвилі, подразнюючі запахи та інші явища.

Хоча названі фізичні фактори не можна безпосередньо вважати шкідливими викидами в атмосферу, але вони, безперечно, посилюють негативний вплив середовища на працездатність та здоров'я людей. У цьому випадку слід говорити про більш небезпечний варіант комбінованого забруднення, коли об'єднується дія атмосферних токсинів з одного боку і шкідливих фізичних явищ з іншого.

Важливо відзначити суть комбінованої дії полютантів на організм людини. Відомо, що у кожній країні (у тому числі і в Україні) існує створена на державному рівні система нормування шкідливих викидів Ця система, як правило, розроблена і використовується для кожного інгредієнта окремо. Разом з тим, шкідливий вплив комбінованого забруднення середовища на людей і живі істоти з медичної та біологічної точки зору на даний час ще недостатньо досліджений. Справа в тому, що людина піддається шкідливому впливу комбінованих забруднень протягом усього свого життя. В цьому випадку дуже складно створювати відповідну медичну статистику. Нові статистичні дані про стан здоров'я людей, які піддавалися дії комбінованого шкідливого впливу забрудненого середовища, показують, що при цьому виникає широкий список різних патологій:

- захворювання органів дихання різного характеру (подразнення та запалення слизової оболонки, тимчасова та стійка патологія бронхо-легеневої системи, набряк легень);

- тяжке отруєння чи летальна загроза;
- алергія, астматичні синдроми, поліноз;
- онкологічні захворювання;
- патологія імунної та ендокринної систем, ослаблення імунітету;
- порушення репродуктивних функцій;
- патологія серцево-судинної системи;
- накопичення токсинів в організмі та передача їх майбутнім поколінням;
- головний біль, психічні розлади та інші типи патологій центральної нервової системи;
- пошкодження ДНК клітин та виникнення локалізованих мутацій;
- захворювання очей та шкіри;
- шкідливий вплив на плід у вагітних жінок;
- патології шлунково-кишкової системи та системи харчування.

На початкових стадіях перебування у забрудненому середовищі людина ще не втрачає здоров'я, але відчуває негативний вплив поллютантів. При цьому можуть виникнути: загальна слабкість, втома, нежить, кашель, головний біль, непритомність, безсоння або сонливість, відчуття страху, втрата апетиту та інші ознаки.

Детальний аналіз комбінованого впливу забрудненого середовища на працездатність та здоров'я людей – справа медичної науки та практики. В технологіях екологічного прогнозування розглядаються проблеми комп'ютерного моніторингу стану повітряного середовища при його комбінованому забрудненні. Наведені вище дані про вплив забруднень на організм людини ілюструють лише актуальність і важливість проблеми, яка розглядається. З метою більш детального ознайомлення з дією різних поллютантів на здоров'я людей можна скористатися узагальненою таблицею 4.4.

Таблиця 4.4

Вплив поллютантів на здоров'я людей

№ з/п	Характер впливу	Поллютанти
1	Захворювання органів дихання	Оксид вуглецю, оксид сірки, двооксид і чотириоксид азоту, смоги, пил, аміак, бензопірен, біополлютанти, сірководень, електромагнітне випромінювання
2	Серцево-судинні патології	Оксид вуглецю, аміак, фтористий водень, сірководень, електромагнітне випромінювання
3	Захворювання центральної нервової системи	Оксид вуглецю, важкі метали, сірководень, формальдегід, фенол, електромагнітне випромінювання

№ з/п	Характер впливу	Поллютанти
4	Патології імунної та ендокринної системи	Діоксин, важкі метали, фенол, ЕМВ, радіонукліди
5	Онкологічні захворювання	Смоги, бензопірен, діоксин, формальдегід, радіонукліди
6	Алергія, астматичний синдром	Біополлютанти, фенол, пил, смоги
7	Порушення репродуктивних функцій	Діоксин
8	Захворювання очей та шкіри	Оксид сірки, чотириоксид азоту, смоги, аміак, бензопірен, діоксин, сірководень, формальдегід
9	Патології шлунково-кишкової системи	Фтороводень, важкі метали, радіонукліди
10	Накопичення токсинів в організмі та передача наступним поколінням	Діоксин, радіонукліди
11	Патології вагітності	Діоксин, формальдегід
12	Порушення ДНК клітин та мутації	Радіонукліди, бензопірен, формальдегід, ЕМВ
13	Тяжкі отруєння або летальна загроза	Оксид вуглецю, оксид сірки, смоги, фтористий водень, діоксин, радіонукліди

4.6 Питання для самоконтролю

1. Які речовини утворюються при горінні? Які з них відносяться до природних компонентів, а які до категорії забруднювачів?
2. В наслідок чого утворюються шкідливі речовини?
3. Які є способи класифікації шкідливих речовин?
4. Які характерні ознаки *окису вуглецю*?
5. Які характерні ознаки *оксидів сірки*?
6. Які характерні ознаки *оксидів азоту*?
7. Описати великий клас сполук – *вуглеводні*.
8. Як утворюються та впливають на людину та стан атмосфери продукти фотохімічних реакцій?
9. Які джерела утворення пилових викидів? Який вони мають вплив на людину та навколишнє середовище?
10. Які джерела утворення біополлютантів? Який вони мають вплив на людину та навколишнє середовище? В чому полягає небезпека комбінованих забруднень?

4.7 Тестові завдання

Тест 4. Походження та класифікація забруднюючих речовин

1. Які з вказаних речовин відносяться до природних компонентів?
 - а) тільки H_2O ☐
 - б) тільки CO_2 ☐
 - в) H_2O і CO_2 ☐
 - г) CO ☐

2. Які з вказаних речовин відносяться до категорії забруднювачів?
- а) H_2O і CO_2 ☐;
 - б) CO , SO_x , NO_x ☐;
 - в) CO ☐;
 - г) SO_x , NO_x ☐.
3. Які причини утворення шкідливих речовин?
- а) антропогенні явища ☐;
 - б) виверження вулканів ☐;
 - в) лісові пожежі ☐;
 - г) все перелічене вище ☐.
4. З точки зору забруднення довкілля шкідливі речовини поділяють на:
- а) алергени, мутагени, канцерогени ☐;
 - б) отруйні речовини ☐;
 - в) інгредієнти радіоактивного та комплексного впливу ☐;
 - г) все перелічене вище ☐.
5. За хімічним складом шкідливі речовини поділяють на:
- а) сполуки сірки та сполуки азоту, сполуки вуглецю ☐;
 - б) галогени та їх сполуки, метали та їх сполуки ☐;
 - в) сполуки, які виникають при фотохімічному синтезі та вільні радикали ☐;
 - г) все перелічене вище ☐.
6. Від яких основних параметрів залежить дія шкідливих речовин на людину та природне середовище?
- а) концентрації і часу експозиції ☐;
 - б) концентрації ☐;
 - в) часу експозиції ☐;
 - г) швидкості вітру ☐.
7. Які нормальні умови в повітрі?
- а) $t=10^\circ\text{C}$, $p=760$ мм рт. ст. ☐;
 - б) $t=15^\circ\text{C}$, $p=760$ мм рт. ст. ☐;
 - в) $t=25^\circ\text{C}$, $p=700$ мм рт. ст. ☐;
 - г) $t=20^\circ\text{C}$, $p=700$ мм рт. ст. ☐.
8. В яких одиницях вимірюється концентрація шкідливих речовин?
- а) г ☐;
 - б) $\text{г}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ ☐.

- в) мг/с ☐;
- г) мг/м³ ☐.

9. Що є основними джерелами CO у містах?

- а) промислові підприємства ☐;
- б) автотранспорт ☐;
- в) промислові підприємства та автотранспорт ☐;
- г) пожежі ☐.

10. Яка хімічна формула та атомна вага чадного газу?

- а) CO, 28 ☐;
- б) CO₂, 44 ☐;
- в) SO₂, 64 ☐;
- г) NO, 30 ☐.

11. Які речовини відносяться до вуглеводнів?

- а) метан ☐;
- б) етан ☐;
- в) пропан ☐;
- г) все перелічене вище ☐.

12. Вказати формулу для середньорічної швидкості V_{cp} ?

- а) $V_{cp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n V_i$ ☐;
- б) $V_{cp} = \sum_{i=1}^n V_i$ ☐;
- в) $V_{cp} = \sum_{i=1}^6 V_i$ ☐;
- г) $V_{cp} = \sum_{i=1}^{10} V_i$ ☐.

13. Який процес вважається квазістаціонарним?

- а) час переміщення забруднювача від джерела до рецептора ☐;
буде істотно більшим за час зміни швидкості вітру
- б) час переміщення забруднювача від джерела до рецептора ☐;
буде істотно меншим за час зміни швидкості вітру
- в) час переміщення забруднювача від джерела до рецептора ☐;
істотно не відрізняється за час зміни швидкості вітру
- г) жодна відповідь невірна ☐.

14. Від чого залежить параметр шорсткості?

- а) від висоти ☐;
- б) від тиску ☐;
- в) від температури ☐;
- г) від типу підстильної поверхні ☐.

15. Що таке роза вітрів?

- а) векторна діаграма, що характеризує режим вітру в даному місці за певний період ☐;
- б) стовбчаста діаграма, що характеризує режим вітру в даному місці за певний період ☐;
- в) лінійна діаграма, що характеризує режим вітру в даному місці за певний період ☐;
- г) жодна відповідь невірна ☐.

5. Джерела шкідливих викидів

Мета: ознайомити з основними джерелами шкідливих викидів

Джерела шкідливих техногенних викидів можна класифікувати за декількома ознаками. Переважна кількість джерел стаціонарно розташовані в якомусь географічному пункті. Цей клас джерел можна визначити як *стаціонарні*. Інший клас – це джерела, що переміщуються в просторі і визначатимемо як *рухомі (нестационарні)*.

У свою чергу стаціонарні джерела поділяються на кілька основних груп:

1. Підприємства з виробництва електричної, теплової енергії та пари за рахунок спалювання органічного палива.
2. Атомні електростанції.
3. Чорна та кольорова металургія.
4. Хімічна промисловість.
5. Виробництво будівельних матеріалів.
6. Гірничодобувна промисловість.
7. Машинобудування.
8. Комунальна сфера.
9. Інші підприємства та джерела.

До рухомих джерел відносять автомобільний та залізничний транспорт, а також авіацію. Надводний транспорт забруднює атмосферу міст при активному русі на річках і в приморських містах з великими портами.

Існують інші ознаки класифікації. Залежно від геометричної форми самого джерела вони поділяються на *точкові, лінійні, площадні та об'ємні*. Крім того, джерела можуть мати постійну або змінну масову витрату викидів. Розглядають також такі варіанти як: джерела безперервних викидів (наприклад,

теплоелектростанції), джерела періодичних викидів (які обумовлені технологічними циклами) та миттєві викиди (при аваріях, вибухах тощо).

Нарешті, однією з ознак класифікації може бути *хімічний склад або фізичний стан домішки*, що викидається, тобто різні гази, тверді та крапельно-рідкі частинки.

Частка кожного з названих типів джерел у кожному з великих міст буде, різною.

5.1 Теплові електростанції та теплоелектроцентралі

Електрична та теплова енергія в цих комплексах виробляється за рахунок спалювання органічного палива: вугілля, мазуту, та природного газу. Такі види палива, як торф, деревина, біогаз і т. п. використовуються для отримання енергії в значно менших масштабах, тому утворюють меншу частку шкідливих викидів. У процесі спалювання палива утворюються такі речовини як: *діоксид вуглецю, діоксид і триоксид сірки, оксид і діоксид азоту* (при високотемпературному горінні). Органічні палива (особливо вугілля та нафта) можуть містити слідові кількості багатьох елементів, частина з яких у вигляді оксидів або інших сполук також надходить у повітря. Це такі елементи, як хром, ванадій, свинець, германій, берилій, миш'як, фтор та інші. Більшість з них мають шкідливий вплив на навколишнє середовище. *При неповному згорянні палива утворюються такі речовини, як оксид вуглецю, вуглеводні, альдегіди, кетони, органічні кислоти та інші речовини.*

Розглянемо спочатку проблему викидів **оксидів сірки**, як одного з основних забруднювачів атмосфери. Відомо, що вміст сірки у вугіллі та нафті коливається в широких межах у залежності від їх виду та генезису. Так у кам'яному вугіллі її зміст може бути близько 1 % (в антрацитах) і понад 5 % в окремих сортах бурого вугілля. В окремих сортах нафти частка сірки може бути менше 1 %, а в інших сортах – до 5 %. *При згорянні вугілля та нафти переважна частка сірки (95 % – 98 %) йде у вихлопи та лише невелика частина випадає у вигляді золи. Відхідні гази великих електростанцій, що працюють на бурому вугіллі, містять зазвичай від 0,1 % до 0,2 % діоксиду сірки за об'ємом. Триоксид сірки надходить в атмосферу у значно менших кількостях. Вважається, що він в основному утворюється в результаті каталітичного окислення на оксидах металів (марганцю та заліза). Наприклад, електростанція потужністю 100 МВт споживає за рік 6 млн. т. низькокалорійного бурого вугілля (зі вмістом сірки 1,5 %), викидаючи в атмосферу в цей же період приблизно 165 тис. т. діоксиду та 5 тис. т. триоксиду сірки.*

Теплоелектростанції, що працюють на нафті викидають у атмосферу приблизно вдвічі менше оксидів сірки (при одній і тій ж потужності). Це обумовлено більш високою теплотворною здатністю нафти (яка дорівнює

приблизно 42000 кДж/кг) у порівнянні з вугіллям. Для бурого вугілля цей показник дорівнює приблизно 10500 кДж/кг.

Оксиди азоту утворюються як побічна реакція горіння, оскільки обидві речовини, а саме азот і кисень, містяться в повітрі, а не в самому паливі. Процес окислення азоту починається при температурах близько 1000°C і досягає максимуму при температурі близько 2700°C. При цій температурі об'ємна концентрація оксидів азоту досягає 5,2 %. Безпосередньо у печах (промислових та побутових) ця частка істотно менша. Більше того, при охолодженні після вихлопу об'ємний вміст оксидів зменшується, оскільки вони розкладаються на вихідні компоненти. Тим не менш, небезпека забруднення повітряного середовища оксидами азоту, що утворюються в так званих «гарячих» печах, досить висока.

В окремих сортах бурого вугілля, що спалюється в печах тепло електростанцій, *міститься миш'як та фтор*. Хоча у викидах міститься невелика кількість цих речовин, проте через свою токсичність, вони можуть завдати значної шкоди людям, тваринам і рослинам. При виробництві електричної, теплової енергії та пари утворюються також *тверді (пилові) та рідко-крапельні забруднення*, що надходять в атмосферу. При цьому *тверді* частинки в основному утворюються *при спалюванні вугілля*, а *рідкі* забруднення (тумани та краплі) утворюються *при конденсації парів*. Оскільки утворення рідких частинок на теплоелектростанціях менш характерно, слід згадати в основному про процеси утворення пилу. У цьому випадку тверді частинки утворюються як продукти згоряння (сажа та зола). У промислових газах, які надходять від кам'яновугільних печей, що мають грати з низьким продуванням, надходить до 10 г/м³, а без піддуву – до 30 г/м³ пилу.

Крупнодисперсний пил утворюється у ґратових печах, а *мілкодисперсний пил* – у грануляційних печах, у яких вугілля подрібнюється до надходження до зони горіння. В останньому випадку концентрація пилу досягає 25÷30 г/м³.

Загалом дані показники є досить наближеними, оскільки вони суттєво залежать від багатьох факторів, а саме: *типу вугілля, що спалюється, ступеня подрібнення при грануляції, організації процесу горіння та ін.*

Для видалення пилу у відпрацьованих газах застосовують *механічні та електричні сепаратори* різного типу.

Слід мати на увазі, що крім викидів пилу у складі продуктів горіння, необхідно враховувати і викиди від допоміжних операцій, таких як: *сушіння, розмелювання палива, транспортування вугілля та золи* тощо.

Для оцінки рівня забруднень атмосфери викидами теплових електростанцій на території України можна скористатися географією їх розміщення та їх енергетичними параметрами. Практично всі станції розміщені на невеликому віддаленні від міст, і тому є серйозними забруднювачами міського середовища. В оцінках обсягу викидів слід врахувати відхилення від

норм і стандартів, обумовлені зносом застарілого очисного обладнання та іншими технологічними факторами, характерними для більшості ТЕС.

5.2 Чорна та кольорова металургія

Відомо, що чорна металургія є однією з базових галузей промисловості в нашій країні. Металургійні підприємства, як правило, розташовані у великих містах та індустріальних центрах і є основними забруднювачами їхнього повітряного середовища.

Металургійна промисловість – це сукупність багатьох технологічних процесів: виробництво сирого чавуну (доменні печі), виробництво сталі (кисневі конвертори, мартенівські, електродугові та двоходові печі), ливарне та вагранкове виробництво, одержання феросплавів.

Прокатне виробництво та деякі інші технологічні процеси також супроводжуються викидами в атмосферу, але їх обсяги менші, ніж у згаданих вище виробництвах.

Викидами супроводжуються і деякі допоміжні процеси. До них слід віднести, роботу агломераційних та коксових установок, а також видобуток та збагачення руд.

Детальний опис технологічних процесів у металургії було викладено у дисципліні «Технології основних виробництв». В «Технологіях екологічного прогнозування» акцент робиться на речовинах, що викидаються в атмосферу.

Основним агрегатом у виробництві чавуну є доменна піч. У шахтну піч заввишки 10÷30м та внутрішнім діаметром 4÷7 м у визначеному порядку поміщають сировинні матеріали (залізну руду, металобрухт, агломерат), а також кокс і шлакоутворюючі агенти. При горінні коксу утворюється *колошниковий газ*, у якому міститься *оксид вуглецю*. Відновлення заліза із руди відбувається за рахунок взаємодії з розпеченим коксом та оксидом вуглецю (останній утворюється при спалюванні коксу).

Основний продукт доменних печей – сирий чавун. Побічними продуктами є *доменний шлак та колошниковий газ*. Колошниковий газ утворюється в доменному процесі у співвідношенні 1000м³ на 1т чавуну (зазначимо, що добова продуктивність доменної печі може бути понад 1000 т чавуну). Цей газ є сумішшю горючих (*оксид вуглецю, водень, метан*) і негорючих компонентів (*вуглекислий газ та азот*). Він частково використовується для обігріву та отримання додаткового тепла при спалюванні. Газ після *допалювання* повинен проходити подвійне очищення перед викидом в атмосферу з метою доведення суміші до допустимої норми (до 20 мг/м³). Однак ступінь очищення в багатьох випадках не відповідає нормі та значна частина твердих частинок, що утворилися, надходить в атмосферу. Крім колошникового газу, в атмосферу

надходить багато пилу. У самому процесі вона утворюється у співвідношенні від 20 до 300 кг на 1 т сирого чавуну або з концентрацією від 10 до 100 г/м³.

У містах, де є металургійні підприємства, помітно як у зимовий період сніг покривається чорною кіптявою. Це і є найбільш видимі наслідки, що супроводжують основні металургійні цикли.

Виплавка сталі проводиться в конверторах і сталеплавильних печах. У конверторах з метою розуглерожування рідкого чавуну в розплав вдується збагачене киснем повітря, чистий кисень або суміш кисню з перегрітою парою. Такий процес проходить протягом короткого проміжку часу (до 20 хв), що забезпечує його високу продуктивність. Полум'я, що вилітає з горловини конвертора, містить високотемпературний газ (від 1200 до 2400°C) та тверді випромінюючі частинки.

Газ складається в основному з *оксиду вуглецю з добавкою діоксиду вуглецю*. Випромінюючі частинки («коричневий дим») складається в основному з оксидів заліза і марганцю. При повітряному дутті вони мають розмір близько 0,05 мкм, а при кисневому – 0,1 мкм. Більш великі частинки (більше 1 мкм є частинками шлаку та оксиду кальцію). Оксиди заліза у викидах становлять 80 – 85%, а їх концентрація змінюється у межах – від 15 г/м³ до 150 г/м³. Відділення газових викидів від пилу дуже важко через їх високу температуру.

У сталеплавильних печах процес виплавки сталі більш довший – у тандем-печах – до 60 хв, а мартенівських печах – до 8 годин.

У двошовних печах також відбувається утворення «коричневого диму» з високою концентрацією твердих частинок у межах від 5 до 50 г/м³. *Великими джерелами пилу*, особливо при кисневій інтенсифікації плавки, є *електродугові печі*. У цьому випадку на 1 т виробленої сталі припадає 5÷9 кг пилу. У таблиці 5.1 наведено дані про концентрацію пилу у викидах сталеплавильних агрегатів.

У ваграних печах зверху в шахту завантажуються шихта, тобто шари металеві сировини, що перемежуються (сирий чавун, литий чавун, сталеві відходи, брухт, феросплави), а також шари коксу та шлакоутворювальних добавок. У нижню частину подається холодне або нагріте повітря. У процесі гарячого окиснення відбувається утворення заліза, шлаку та інших побічних продуктів. *Колошникові гази*, що відходять, містять 2 – 18 % діоксиду вуглецю, 5 – 21 % оксиду вуглецю, до 16 % кисню, до 1 % водню, до 0,1 % діоксиду сірки, а також азот та пари води. Пил, що відходить, містить діоксид кремнію (30 – 60 %), залізо та його оксид (до 25 %), оксид кальцію (до 20 %), марганцю (до 9 %), магнію (до 5 %), а також оксиди алюмінію, цинку, олова та свинцю. Концентрація пилу в колошникових газах коливається в діапазоні від 2 до 25 г/м³.

При виробництві феросплавів також відбувається викид забрудненого домішками газу та пилу. Так, при отриманні феросиліцію (FeSi) у відкритих електродугових печах відбуваються вихлопи діоксиду сірки та оксиду вуглецю.

Концентрація пилу вимірюється в діапазон від 2 до 15 г/м³ при 100 – 280 кг на 1 т сплава.

Таблиця 5.1

Концентрація пилових викидів під час роботи сталеплавильних агрегатів

Тип агрегата	Концентрація, г/м ³	Температура процесу згоряння, (°C)
Філіпс-мартен	0,8 – 3	330 – 550
Марц-Бохен	3,5 – 5	300 – 600
Тандем	20	150 – 600
Електродугова (+O ₂)	1,5 – 3,5 Максимум – до 9	120 – 200
Кисневий конвертор	30 – 50 Максимум – до 150	150 – 300

У ливарному виробництві пил утворюється при формуванні, виробництві сердечників, розливанні сталі, виколотці, очищенні, підготовці формувального піску та інших операціях. Викид пилу відбувається через витяжку. Хоча концентрація пилу невисока, але в ній є *частинки кварцу*, які вважаються досить *небезпечним* інгредієнтом.

В процесі агломерації великі частинки пилу спікаються у більші грудочки. Суміш пилу коксу та інших добавок обпалюється на рухомих стрічках, агломераційних установок при температурах не нижче 270°C. Кількість відхідних газів у своєму складі має 5 – 10 % оксиду вуглецю, 0,5 % діоксиду вуглецю, сірки, азоту, кисню. Концентрація змінюється від 1000 до 4000 м³ на 1 т руди. Концентрація пилу в газах, що відходять, становить від 2 до 20 г/м³. У складі пилу міститься приблизно 50 % заліза, по 10 % оксидів кремнію, кальцію та алюмінію, а також інших речовин.

Отримання коксу включає кілька операцій, які супроводжуються виділенням газів та пилу. Ці операції включають заповнення коксових батарей вугіллям, випресовування коксу з цих батарей та його гасіння. Основне газовиділення відбувається на першій операції, коли вугілля стикається з гарячими стінками камери. При цьому виділяється коксовий газ із парами смоли. Кількість газових викидів становить 3 – 5 м³ на 1 т сухого вугілля, а вміст смолистих речовин - від 0,2 до 0,5 кг на 1 т.

При вивантаженні коксу з батарей виділяється пил. Гасіння коксу водою в басейні-гасителі супроводжується виділенням водяної пари, що несе з собою гідросульфат, аміак, діоксид сірки, гідроцианід та феноли. При цьому на 1 т сухого коксу виділяється 0,01 – 0,04 кг гідросульфиду, 0,006 кг ціаніду, 0,08 – 0,1 кг фенолу.

Виробництво кольорових металів характерне вмістом в викидах надзвичайно шкідливих та токсичних речовин. При виробництві алюмінію розрізняють дві різні технології: виробництво оксиду алюмінію Al₂O₃ з

бокситової руди та електролітичне отримання Al з його руди. При цьому на першому етапі руду дроблять, висушують, обпікають у печах. При виробництві анодних матеріалів концентрація пилу досягає 15 г/м^3 (це переважно Al_2O_3 та кріоліт). При *електролізі* виділяються гази, серед яких найнебезпечнішим є *фтор*. Кількість фтору, що викидається, включаючи тверді фториди, гідрофторид та інші з'єднання, залежить від електролізера та анодів, а також від організації заходів, щодо зниження викидів. За високого ступеня очищення можна отримати приблизно 1 – 2 кг на тонну продуктивного алюмінію. При поганому очищенні цей показник може зростати до 15 – 20 кг на 1 тонну.

Отримання цинку, свинцю, міді та нікелю також пов'язане з викидами в атмосферу шкідливих та токсичних речовин.

При виробництві *свинцю* із сульфідних руд або рудних концентратів шляхом плавки у багатоступінчастій печі виділяється значна кількість *діоксида сірки* (об'ємна концентрація досягає 4 – 8 %), а також оксид миш'яку і оксиди свинцю.

Мідь виробляють з сульфідних концентратів, що одержують флотацією та плавкою в печі. Гази, що відходять від плавильних печей, містять діоксид сірки, свинець, олово, оксид миш'яку. Концентрат потім переробляється в конверторах з виділенням летких оксидів металів.

На території України розміщено значну кількість (близько 2000) підприємств чорної та кольорової металургії. Екологічна небезпека від їхньої діяльності полягає в тому, що велика частина з них розміщена в містах або на щільно заселених територіях.

В Україні сформувалися і функціонують кілька центрів чорної металургії: Придніпровський, Донецький та Приазовський. Перший з них включає п'ять великих вузлів: Дніпропетровський, Криворізький, Запорізький, Миколаївський та Кременчуцький. Це найбільш потужний центр металургійного виробництва.

Підприємства кольорової металургії розміщені переважно поблизу місць видобутку сировини. В Україні є родовища алюмінію, марганцю, ртуті, магнію, цирконію, золота та інших металевих руд. Алюмінієва промисловість представлена Запорізьким алюмінієвим комбінатом, Миколаївським глиноземним заводом. Родовища нікелю невеликі – Житомирська область та Придніпровський регіон. Марганець, уран, цирконій та титан добувають на Дніпропетровщині, золото – у Кропивницькій та Закарпатській областях. Основну частку міді, свинцю, олова, цинку, сурми Україна імпортує з інших країн.

5.3 Хімічна промисловість

Підприємства хімічної промисловості дуже різняться за профілем своєї діяльності, а отже, і за складом техногенних викидів. Речовини надходять в

атмосферу у вигляді газів, пари, туману та пилу. Вони можуть класифікуватися як *шкідливі, токсичні чи речовини з неприємним запахом*.

В атмосфері навколо хімічних підприємств ідентифікують близько 100 сполук. У цю категорію входять як органічні, так і неорганічні речовини. До найбільш важливих газоподібних забруднень з точки зору їх токсичності та об'ємів, що надходять в атмосферу, відносяться: хлор, діоксид і триоксид сірки, оксиди азоту, сірчана і азотна кислоти, хлористий водень, гідросульфід, фтористий водень, дисульфід вуглецю, фтор та його з'єднання. Сюди ж можна віднести органічні сполуки: тіоли, вуглеводні та їх хлорпохідні, альдегіди, кетони та органічні кислоти.

Слід також згадати органічні сполуки: фенол, креол, ксилол, толуол, етилбензол, стирол, антрацен, фенантрен, пірен, флюорен, бензопірен, діоксини та фурани.

Розглянемо деякі основні види хімічних виробництв відносно їх викидів у повітряне середовище.

При виробництві *сірчаної кислоти*, як відомо, сировиною служить *пірит* або *природна сірка*. Технологічний ланцюжок одержання кислоти з даної сировини виглядає таким чином:

- отримання діоксиду сірки при випаленні піриту або спалюванні сірки;
- очищення та окислення отриманого газу (що містить 7 – 11 % діоксиду сірки по об'єму) при контакті з киснем повітря на ванадієвому каталізаторі при температурі 430 – 480°C з метою одержання триоксидів;
- охолодження та надходження в олеумний абсорбер (олеум – суміш триоксиду сірки та сірчаної кислоти);
- надходження суміші в поглинальну вежу, в якій знаходиться 97 % кислота і доведення концентрації продукту до 98 %.

На всіх стадіях неокислений діоксид може надійти у повітря (1,5 – 2 % у викидах за обсягом).

Крім того, відбувається викид триоксиду сірки (0,01 – 0,1 %) та сірчаної кислоти у вигляді туману.

Отримання азотної кислоти засноване на каталітичному окисленні аміаку в оксид азоту з подальшим доокисленням у діоксид в окислювально-абсорбційних апаратах. Кислота одержується при поглинанні діоксиду водою. Питомий викид оксидів азоту в атмосферу при продуктивній очистці становить 25 кг на 1 т продуктивної кислоти. При об'ємних концентраціях оксидів азоту у повітрі більше 0,03 % газова суміш забарвлюється в характерний буро-жовтий колір. Такі димові хвости видно далеко від джерела викидів.

Отримання соляної кислоти відбувається у дві стадії. Спочатку одержують так званий гідрохлорид у результаті прямої реакції хлору з воднем за високої температури. Отриманий гідрохлорид поглинається водою та утворюється

соляна кислота. Вихідний і кінцевий продукт при попаданні в атмосферу вважається шкідливим викидом.

При виробництві фосфорної кислоти забруднюючою речовиною є гідрофторид. Ця ж речовина викидається в атмосферу при виробництві фтористоводневої кислоти.

Одним із токсичних газів, що широко використовується в промисловості, є хлор. Викиди хлору в атмосферу можуть відбуватися при отриманні цього продукту шляхом *електролізу з хлористого натрію*. На катоді натрій взаємодіє з водою та утворює гідроксид. Викиди хлору відбуваються у разі, якщо гідроліз мало герметизований. Хлор може знаходитися у відхідних газах при отриманні хлорованих продуктів.

Значні газові викиди утворюються під час *виробництва целюлози сульфатним методом*. При цьому в атмосферу потрапляє діоксид сірки, і такі пахучі речовини як метанол, диметилсульфід. Хоча викид цих речовин незначний, проте їх вплив на людей і живі істоти може бути досить чутливим.

Виробництво добрив. Добрива типу NPK (азотно-фосфорно-калійні) виходять з таких сировинних компонентів як природний фосфат, азотна кислота або аміак та хлорид або сульфат калію. Іноді використовують фосфорну або сірчану кислоти. Першим етапом у виробництві добрив є азотнокислотне розкладання природного фосфату та регулювання співвідношення CaO та P_2O_5 . Потім суспензія нейтралізується аміаком, вводяться добавки калійних солей. Отриманий продукт гранулюється, сушиться, охолоджується і сортується по крупності. Основний компонент викиду – фтор (до 10 % від його вмісту у сировині). Найбільшими джерелами викидів сполук фтору в хімічній промисловості є заводи із виробництва суперфосфату. Сировиною для її отримання є природні фосфати (апатит, фосфорит, фтор-апатит). Сировину розмелюють, подають у реактор-змішувач, куди додається сірчана кислота 63 – 73% концентрації. Суміш дозріває в спеціальній камері і твердне в готовому для використання вигляді.

Основна шкідлива речовина, що викидається – *гідрофторид*.

Підприємства хімічної промисловості розміщені практично на всій території України за винятком окремих курортно-оздоровчих, природоохоронних, заповідних зон. Насамперед слід зазначити, що в галузь хімічного виробництва залучено досить високий науковий потенціал, тому продукція хімічних підприємств відрізняється досить високою якістю і конкурентноспроможна не лише на внутрішньому, а й на зовнішньому ринку.

Розвиток хімічної промисловості обумовлений наявністю досить багатой сировинної бази. Органічні продукти, тобто природний газ і нафту, хоч і не можуть повністю забезпечити потреби енергетики, в той же час, в основному покривають виробничі потреби хімічної галузі. В Україні є значні запаси таких видів сировини як вугілля, сірка, кухонна та калійна солі, карбонатна сировина

та інші продукти. Великі запаси титанових руд використовуються не тільки в металургійній, але й у хімічній галузі (для отримання лаків та фарб).

У коксо-хімічному виробництві, крім отримання основного продукту – коксу, одержують низку інших хімічних речовин, які використовуються для отримання добрив, анілінових фарб та інших продуктів.

Нафтохімічна промисловість забезпечує отримання продуктів органічного синтезу: синтетичні спирти, органічні кислоти, альдегіди, кетони, феноли. В Україні розміщеноб нафтоперегінних заводів (Кременчуцький, Лисичанський, Херсонський, Одеський, Дрогобицький та Наддніпрянський). Крім світлих нафтопродуктів на заводах виробляють і продукти органічного синтезу.

Крім того, синтетичні продукти виготовляє лакофарбова та аніліно-фарбова промисловість, основні підприємства якої розміщені в Луганську, Донецьку, Дніпрі, Кривому Розі.

Синтетичні смоли та пластмаси виробляють у Донбасі, Наддніпрянщині, Черкасах та Одесі, а синтетичні волокна у Києві, Чернігові, Черкасах, Житомирі та Сокалі (Львівська область).

Хімічна галузь включає підприємства з виробництва гумо-технічних виробів. Вони розміщені в Дніпропетровську та Білій церкві. У зв'язку із скороченням виробництв та використанням сучасних технологічних засобів уловлювання та фільтрації значно зменшились обсяги шкідливих викидів.

5.4 Виробництво будівельних матеріалів

Виробництво будівельних матеріалів супроводжується в основному викидами *дисперсних твердих речовин*.

До категорії цих виробництв належать: цементні заводи, вапняні печі, установки з виробництва магнезиту, печі обпалу цегли, виробництво ізоляційних матеріалів, вогнетривкої глини, керамічні заводи, установки з виробництва асфальту та інші підприємства. Висока запиленість характерна не тільки для самого технологічного процесу, але і для таких операцій, як дроблення, навантаження-вивантаження, транспортування та інших.

Як приклад, розглянемо процес отримання цементу.

Сировиною для отримання цементу служить вапняк, силікати, алюмінати кальцію, сланець, мергель, доменний шлак, клінкер, зола, гіпс, вугільний пил, кокс, залізняк. Клінкер, як складовий елемент, одержують при випаленні розмелених кальцієвих мергелів та вапняку, ґрунту, карбонату кальцію та інших добавок. Процес здійснюється сухим способом або шляхом флотації у воді (мокрый спосіб).

На цементних підприємствах джерелами викидів є такі операції:

- підготовка сировини (дроблення, барабанна сушка, розмелювання, транспортування);

- випал клінкеру (сушіння вугілля, розмелювання сировини, шахтні печі, що обертаються, охолодження, транспортування);
- виробництво цементу (підготовка гіпсу, цементні млина, транспортування);
- відвантаження (фасування, складування, транспортування, вапняна піч).

Загалом для отримання 1 т цементу необхідно роздробити, розмолоти, обпалити та перевести майже 3 т вихідного продукту. При розмелюванні та сушінні продуктів концентрація пилу у відпрацьованих газах досягає 200 г/м^3 . У печах випалу утворюються викиди з концентрацією пилу до 30 г/м^3 і більше. Склад пилу, що відходить досить складний (більше десятка речовин), серед яких: оксид кальцію (до 48 %), діоксид кремнію (до 22 %), оксид натрію (0,5 – 50 %), оксид алюмінію (до 12 %), триоксид сірки (до 13 %) та інші.

Основні підприємства з виробництва будівельних матеріалів розміщені практично по всій території країни. В даний час більше половини підприємств цього типу знаходяться в складі будівельних організацій, формуючи при цьому специфічні індустріально-будівельні об'єднання. Загалом в Україні функціонують понад тисячу підприємств будматеріалів. Найбільшими їх виробниками є підприємства, розташовані у Києві, Харкові, Одесі, Дніпрі, Кривому Розі, Запоріжжі, Донецьку, Маріуполі.

5.5 Атомні станції та інші джерела радіонуклідів

Атомні електростанції (АЕС) знаходяться за межами території великих міст, проте в околицях знаходяться невеликі міста, де живуть працівники станцій, а також сільські населені пункти. Тим не менш, населення великих міст схильне до ризику появи в повітряному середовищі радіонуклідів у разі аварійних ситуацій на цих станціях.

Крім АЕС джерелами радіонуклідів, що поширюються у вигляді дрібнодисперсного пилу, є місця видобутку уранових руд, місця зберігання збідненого радіоактивного «сміття», підприємства зі зберігання уранових руд, а також території, на яких поверхня землі була заражена радіонуклідами під час Чорнобильської аварії.

На території України діють 4 атомні станції загальної потужністю 11,8 млн. кВт: Запорізька, Південно-Українська (Ніколаївська область), Хмельницька та Рівненська. Чорнобильська АЕС (Київська область) виведено з експлуатації у 2003р., але наявність на її території так званого «саркофагу» над зруйнованим четвертим блоком і «завантажених» радіоактивним паливом інших блоків також породжує небезпеку можливих викидів.

У процесі роботи АЕС у так званому «штатному режимі» викиди радіонуклідів у довкілля не перевищують допустимих норм. Щодо «нештатних» ситуацій, то тут можна говорити лише про ймовірні оцінки цих

величин. Сумний досвід Чорнобиля дозволяє робити подібні оцінки. З іншого боку, цей досвід спонукав фахівців в атомній галузі до організації нової, більш досконалої системи безпеки на АЕС. Розробка уранових родовищ ведеться на території Дніпровської (Жовті води) та Подільської областей.

Первинне збагачення уранових руд провадиться у місті Ком'янському. Великі поклади мало радіоактивних відходів збагачувального виробництва розташовані за кілька кілометрів на північ від м. Дніпра. Технологічне розпилення (видобуток, навантаження-розвантаження, транспортування) та природне розпилення поверхневого шару призводить до попадання радіонуклідів у атмосферу на околиці зазначених пунктів.

5.6 Рухомі джерела

Основними рухомими джерелами шкідливих викидів, типових для міської території, є легкові та вантажні автомобілі, автобуси та залізничні тепловози. Певну частку забруднень викидає в атмосферу бездорожній транспорт (трактори, бульдозери, навантажувачі тощо), проте ця частка в цілому незначна. Що стосується авіатранспорту та водного транспорту, то його впливом складу міської атмосфери можна знехтувати або обмежитися територіями, безпосередньо прилеглим до аеропортів та водних об'єктів.

В останні роки спостерігається тенденція швидкого наростання щільності автомобільного руху на території великих міст. У світі вже налічується близько 800 млн. автомобілів, в тому числі 80 млн. вантажних та приблизно 1 млн. автобусів. Загальна протяжність автомобільних доріг у всьому світі становить понад 18 млн. км (458 екваторів). Близько 11 млн. км припадає на дороги з твердим покриттям. Кожна подібна траса – це лінійне джерело шкідливих викидів, яке діє на приземному рівні, тобто на рівні пішоходів.

Частка рухомих джерел у загальному обсязі шкідливих викидів безперервно зростає. У великих містах ця частка досягає 70-90% (наприклад, у Києві вона дорівнює 80%).

Встановлено, що один легковий автомобіль щорічно поглинає з атмосфери 4 т кисню, викидаючи з вихлопними газами 800 кг окису вуглецю (CO), 200 кг різних вуглеводнів (C_nH_m), 40 кг оксидів азоту (N_xO_y), а всього – близько 200 хімічних з'єднань, більшість з яких токсичні. Крім названих речовин у продуктах згоряння знаходяться також альдегіди, оксиданти, аерозолі свинцю (при використанні етилованого бензину), бенз(а)пірен, сірчисті сполуки, сажа та інші інгредієнти.

Таблиця 5.2

Порівняльний склад вихлопних газів автомобілів

Речовина	Бензинові двигуни, (об'ємних %)	Дизельні двигуни, (об'ємних %)	Примітка
Азот	74 – 77 %	76 – 78 %	Нетоксичний
Кисень	0,3 – 0,8 %	2 – 18 %	Нетоксичний
Водяна пара	3 – 5,5 %	0,5 – 4,0 %	Нетоксичний
Діоксид вуглецю	5 – 12 %	1,0 – 10,0 %	Нетоксичний
Оксид вуглецю	1 – 7 %	0,01 – 0,5 %	Токсичний
Оксиди азоту	0 – 0,8 %	0,002 – 0,5 %	Токсичний
Вуглеводні	0,2 – 3,0 %	0,01 – 0,5 %	Токсичний
Альдегіди	0 – 0,2 %	0,001 – 0,009 %	Токсичний
Сажа	0 – 0,4 %	0,01 – 1,1 %	Токсичний
Бенз(а)пірен	До 20 мкг/м ³	До 10 мкг/м ³	Канцерогенний

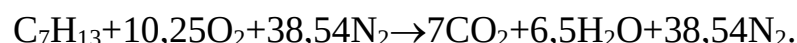
Інтерес становлять питомі викиди, що припадають на одиницю маси палива, що використовується, на кілометр шляху в одиницю часу.

Таблиця 5.3

Шкідливі викиди на 1000 л палива (кг)

Токсичні речовина	Карбюраторні двигуни	Дизельні двигуни
Оксид вуглецю	200	25
Вуглеводні	25	8
Оксид азоту	20	35
Сажа	1	3
Сірчані сполуки	1	31
Всього	247	102

Говорячи про склад вихлопних газів, необхідно розглядати вихідний продукт (пальне) і характер його перетворення у процесі згоряння та вихлопу. Сучасні бензини є складною сумішшю різних вуглеводнів, основними з яких є парафіни (до 58 %), олефіни (до 22 %) та ароматичні з'єднання (до 25 %). Ці та інші вуглеводні різного класу, що включають насичені з'єднання з прямим і розгалуженим ланцюгами, мають різні температури займання, точки кипіння та характеристики горіння. Сумарна хімічна реакція з використанням теоретичного палива в мольних частках може бути представлена у вигляді:



Ця реакція відображає повне згоряння вуглецю та водню без участі азоту. Відношення маси повітря (A) до маси палива (F) називається *стехіометричним співвідношенням* і дорівнює 14,5. Реальне співвідношення A/F може змінюватися в широких межах (від 11 до 18), при цьому малим значенням відповідає недолік повітря (багата суміш), а більшим – надлишок повітря (бідна суміш). У багатих сумішах утворюється окис вуглецю CO і незгорілі вуглеводні

C_nH_m . Окис азоту утворюється при нормальному співвідношенні, тобто при температурі згоряння суміші. Іншими словами, викид шкідливих інгредієнтів суттєво залежить від режим експлуатації автомобіля. *На холостому ході і при гальмуванні* реалізуються високі викиди окису вуглецю і незгорілих вуглеводнів. *При економічних швидкостях і швидкому розгоні* зростають викиди оксидів азоту. Щодо міських умов можна говорити про значні концентрації шкідливих викидів в околиці регульованих перехресть, де є гальмування, холостий хід і швидкий розгін. Обсяги викидів на території міст залежать від інтенсивності руху на кожній із магістралей. У свою чергу, ця інтенсивність може залежати від часу доби та пори року. Так, дослідження цієї ситуації у Парижі показали, що максимум інтенсивності спостерігається в проміжках з 7 до 11 години ранку і з 17 до 20 години вечора, а річна залежність демонструє максимуми з березня по травень і з вересня по листопад. При цьому чіткий мінімум реалізується у серпні. Згадані дослідження підтвердили, чітку кореляцію між інтенсивністю руху та обсягом окису вуглецю.

Обсяг та характер викидів істотно залежить від конструктивних особливостей автомобіля, якості регулювання подачі та спалювання палива. На жаль, вітчизняні автомобілі у цьому сенсі помітно поступаються новим моделям імпортних машин. У нас поки що йдеться про наближення до норм викидів, до яких переходить Західна Європа, а саме Євро-6 та Євро-7 (практична заборона двигунів внутрішнього згорання). Крім конструктивних змін існують і інші способи регулювання шкідливих викидів. Одним з основних підходів у цьому сенс є заміна бензину або дизельного палива іншими видами пального. В принципі дизельні двигуни вважаються меншими токсичними, оскільки в їхньому паливі не міститься свинцевих присадок, а викид вуглеводнів і окису вуглецю на 50-90% нижче. Правда, при цьому викидається більше сажі, продукти вихлопу мають неприємний запах, а двигун створює більше шуму.

У цьому сенсі раціональнішим є обладнання автомобілів газобалонними системами, а також застосування біопалива типу етанолу та електричних двигунів. Така процедура могла б сприяти скороченню токсичних викидів на міських автомагістралях.

5.7 Питання для самоконтролю

1. Які джерела шкідливих техногенних викидів відносяться до стаціонарних?
2. Які джерела шкідливих техногенних викидів відносяться до рухомих?
3. За якими кваліфікаційними ознаками розрізняють шкідливі домішки?
4. Які шкідливі домішки утворюються при роботі теплових електростанцій та теплоелектроцентралей? Охарактеризувати процес їх утворення.

5. Які шкідливі домішки утворюються при роботі підприємств чорної та кольорової металургії? Охарактеризувати процес їх утворення.
6. Які шкідливі домішки утворюються при роботі підприємств хімічної промисловості? Охарактеризувати процес їх утворення.
7. Які шкідливі домішки утворюються при роботі підприємств по виробництву будівельних матеріалів? Охарактеризувати процес їх утворення.
8. Які шкідливі домішки утворюються при роботі атомних станцій? Охарактеризувати процес їх утворення.
8. Які шкідливі домішки утворюються рухомими джерелами забруднення? Охарактеризувати процес їх утворення.
9. Які заходи можна застосовувати для зменшення шкідливих викидів рухомих джерел забруднення?
10. Які переваги та недоліки електродвигунів?

5.8 Тестові завдання

Тест 5. Джерела шкідливих викидів

1. Що відноситься до стаціонарних джерел техногенних викидів?
 - а) підприємства з виробництва електричної, теплової енергії та пари за рахунок спалювання органічного палива ☐;
 - б) чорна та кольорова металургія ☐;
 - в) машинобудування ☐;
 - г) все перелічене вище ☐.
2. Що відноситься до рухомих джерел техногенних викидів?
 - а) підприємства з виробництва електричної, теплової енергії та пари за рахунок спалювання органічного палива ☐;
 - б) автомобільний та залізничний транспорт ☐;
 - в) машинобудування ☐;
 - г) чорна та кольорова металургія ☐.
3. В залежності від геометричної форми самого джерела вони поділяються на?
 - а) точкові ☐;
 - б) площадні ☐;
 - в) об'ємні ☐;
 - г) все перелічене вище ☐.
4. Оберіть за якими кваліфікаційними ознаками розрізняють шкідливі домішки?
 - а) тільки за хімічним складом ☐;
 - б) тільки за фізичним станом ☐;
 - в) за хімічним складом та за фізичним станом ☐.

- г) відсутня правильна відповідь ☐.
5. Яка переважна частка сірки йде у вихлопи при згорянні вугілля та нафти?
- а) 45 % – 48 % ☐.
 - б) 65 % – 68 % ☐.
 - в) 85 % – 88 % ☐.
 - г) 95 % – 98 % ☐.
6. Електростанція, що споживає низькокалорійного бурого вугілля викидає?
- а) тільки діоксид сірки ☐.
 - б) тільки триоксид сірки ☐.
 - в) сірку, діоксид сірки та триоксид сірки ☐.
 - г) тільки сірку ☐.
7. Теплоелектростанції, що працюють на нафті по відношенню до електростанцій, що працюють на бурому вугіллі, викидають в навколишнє середовище?
- а) більше оксидів сірки ☐.
 - б) менше оксидів сірки ☐.
 - в) ці викиди однакові ☐.
 - г) відсутня правильна відповідь ☐.
8. Оксиди азоту, що утворюються при горінні, в результаті?
- а) основної реакції ☐.
 - б) побічної реакції ☐.
 - в) і основної, і побічної ☐.
 - г) відсутня правильна відповідь ☐.
9. Які твердження вірні? При виробництві електричної, теплової енергії та пари утворюються?
- а) *тверді частинки в основному при спалюванні вугілля* ☐.
 - б) *рідкі забруднення (тумани та краплі) при конденсації парів* ☐.
 - в) *тверді частинки при спалюванні вугілля та рідкі забруднення (тумани та краплі) при конденсації парів* ☐.
 - г) правильна відповідь відсутня ☐.
10. Обрати правильне твердження (дві відповіді правильні).
- а) *Крупнодисперсний пил утворюється у ґратових печах* ☐.
 - б) *Крупнодисперсний пил утворюється у грануляційних печах* ☐.
 - в) *Мілкодисперсний пил утворюється у грануляційних печах* ☐.
 - г) *Мілкодисперсний пил утворюється у ґратових печах* ☐.

11. Пил утворюється?

- а) у складі продуктів горіння ☐;
- б) при сушінні та розмелюванні ☐;
- в) при транспортування вугілля та золи ☐;
- г) все перелічене вище ☐.

12. Техногенні викиди хімічної промисловості класифікуються на:?

- а) шкідливі ☐;
- б) токсичні ☐;
- в) речовини з неприємним запахом ☐;
- г) все перелічене вище ☐.

13. Які речовини можуть надходити в атмосферне повітря на різних стадіях технологічного процесу отримання сірчаної кислоти?

- а) діоксид сірки ☐;
- б) триоксид сірки ☐;
- в) сірчана кислота ☐;
- г) все перелічене вище ☐.

14. Що є забруднюючою речовиною при виробництві фосфорної кислоти?

- а) оксид сірки ☐;
- б) діоксид сірки ☐;
- в) оксиди азоту ☐;
- г) гідрофторид ☐.

15. Що є основним компонентом викиду при виробництві добрив?

- а) фтор ☐;
- б) гідрофторид ☐;
- в) оксиди сірки ☐;
- г) оксиди азоту ☐.

6. Теоретичні основи розрахунку рівня забруднення атмосфери

Мета: ознайомити з теоретичними основами методик розрахунку рівня забруднення атмосфери

Атмосферне повітря перебуває в безперервному русі, а речовини, які в ньому знаходяться, піддаються складним фізико-хімічним перетворенням. Всі ці явища підпорядковуються відомим законам природи. Розглянемо ці закономірності окремо.

6.1 Фізичні основи

Закон збереження маси у газовому чи рідкому середовищі висловлює той факт, що зміна маси в якомусь фіксованому об'ємі, обмеженому проникною поверхнею, дорівнює різниці мас, що надходять до цього об'єму та виходить з нього через цю поверхню. У механіці суцільного середовища цей закон називають законом нерозривності. Фізично це означає, що якщо з будь-якого простору повітряна маса виходить (наприклад, при виникненні вітрового потоку), то цей простір заповнюється повітрям, що прийшло з навколишнього простору. При цьому виникають замкнуті осередки циркуляції. Якщо ж розглянути якусь трубку струму з поперечним перерізом S , м^2 і з непроникними бічними стінками, то, відповідно до цього закону, секундна масова витрата Q_m , кг/с у кожному перерізі цієї трубки буде залишатися постійною:

$$Q_m = \rho \cdot V \cdot S, \quad (6.1)$$

де ρ , кг/м^3 є щільність середовища. Якщо газ складається з окремих компонентів, включаючи сюди і шкідливі домішки, закон збереження маси може бути записаний для кожної з цих компонентів окремо. Рівняння збереження маси, записане в диференціальному вигляді, називають рівнянням нерозривності і записують у вигляді:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{v}_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (6.2)$$

де $j=1,2,3$; x_1, x_2, x_3 – декартова система координат, $\bar{v}_j$ – компоненти швидкості.

Закон збереження кількості руху для рухомого середовища (газ, рідина) є узагальненням закону механіки для твердого тіла: **добуток маси тіла на прискорення дорівнює сумі прикладених до нього сил** $m \cdot \vec{a} = \vec{F}$. Для газової частки в атмосфері це рівняння виглядає наступним чином: добуток її маси на прискорення дорівнює в загальному випадку сумі декількох сил. До них слід віднести:

- силу, обумовлену баричним градієнтом (перепадом тиску);
- силу тяжіння;
- силу тертя;
- центробіжну силу, що виникає під час руху по криволінійній траєкторії (циклон, антициклон);
- силу Коріоліса.

Остання сила виникає в результаті обертання Землі навколо своєї осі. Внаслідок цього обертання атмосферна частка отримує додаткове прискорення щодо нерухомого місця, що знаходиться на поверхні Землі. Це прискорення асоціюється з додатковою силою. Рівняння збереження кількості руху,

записується у векторному вигляді або у вигляді проекцій на осі координат. Рівняння руху зазвичай представляється у формі Ейлера (для нев'язкого потоку) або у формі Нав'є-Стокса (з урахуванням сил тертя).

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \bar{v}_k \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_k} \right) = \rho F_i + \frac{\partial p}{\partial x_k} \left(\bar{v}_k \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_k} - \bar{v}_i \bar{v}_k \right), \quad (6.3)$$

де $i=1,2,3$, по індексу k знаходиться сума, $k=1,2,3$.

Закон збереження енергії. Формулюючи цей закон, слід відзначити, що енергія рухомої частинки складається з двох компонентів: кінетичної енергії, яка пропорційна квадрату швидкості її переміщення та внутрішньої енергії, яка визначається її температурою.

Виходячи з цього, закон можна сформулювати таким чином: зміна повної енергії частки визначається підведенням до нею кількістю тепла та роботою, виконаною над нею зовнішніми силами. При цьому тепло може бути підведене як ззовні (за рахунок теплопередачі через поверхню частинки), так і за рахунок внутрішніх джерел тепла (хімічна реакція, конденсація тощо).

Виходячи зі сформульованих законів, можна назвати деякі важливі наслідки. Одне з них полягає в тому, що при прискоренні частки газу, яке дорівнює нулю (наприклад, при постійній швидкості вітру) дія всіх зовнішніх сил врівноважується, тобто їх геометрична сума дорівнює нулю.

При підведенні енергії в загальному випадку змінюються такі параметри частки як її швидкість $\bar{V}$, прискорення $d\bar{V}/dt$, тиск p , щільність ρ , температура T та інші. Для опису процесів у газовому середовищі використовуються різні спрощені термодинамічні моделі.

Модель досконалого газу, що застосовується до повітряного середовища, передбачає простий зв'язок між названими вище параметрами:

$$p = \rho RT, \quad (6.4)$$

де R – це газова стала. Записане співвідношення (6.4) називають *рівнянням стану*.

Адіабатична модель передбачає, що термодинамічні процеси всередині частки (тобто зміна p , ρ , T) відбуваються без енергообміну із зовнішнім середовищем. Саме ця модель використовується, коли йдеться про зміну температури в приповерхневому шарі атмосфери.

Для сухого повітря зв'язок між тиском і температурою в адіабатичному наближенні задається рівнянням:

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^n, \quad (6.5)$$

де $n=0,288$. Індекс «0» позначає фіксоване значення величин, наприклад, параметри гальмування. Звідси випливає, що зі зменшенням температури тиск у частинки газу також зменшується (відбувається розширення) та навпаки. У вологому повітрі показник n буде іншим (волога адіабату). У цьому випадку при тому ж тиску температура частки буде більшою.

Зміна агрегатного стану. Речовини, що знаходяться в атмосфері (насамперед, вода) можуть змінювати свій агрегатний стан. Ці зміни включають: випаровування, конденсацію, замерзання та танення. При цьому в процесі випаровування та танення тепло поглинається, а при конденсації та замерзанні – виділяється. Названі процеси пов’язані зі швидкістю хаотичного (теплого) руху молекул. По міру нагрівання, тобто збільшення цієї швидкості, зростає кількість зіткнень між ними, підвищується температура та речовина переходить послідовно з твердого стану в рідкий, а потім – в газоподібний. Конденсація водяної пари пов’язана співвідношенням парціальних тисків, що знаходяться в суміші повітря p_v і водяної пари p_e . При цьому сумарний тиск дорівнює:

$$p = p_v + p_e. \quad (6.6)$$

Якщо p_e перевищує деяку величину p_e' , то відбувається конденсація вологи та виділення тепла. Відношення p_e / p_e' , виражене у відсотках, називають ступенем насичення або рівнем вологості. Ступінь насичення залежить не тільки від абсолютного значення p_e , а й від температури. Чим нижча температура, тим вищий ступінь насичення. Ось чому при піднятті частки вгору тиск і температура в ній падають, і в деякий момент настає повне насичення, що веде до конденсації. Навколишнє повітря починає від цього нагріватися і рухатися далі вгору. Такий процес дуже характерний для атмосфери над теплим океаном і найчастіше є першою стадією народження ураганів.

Турбулентність. Розрізняють два режими руху газу в рідині: *ламінальний та турбулентний*. Ламінарним називають *стійкий рух без перемішування шарів*. Турбулентний рух є *нестійким і характеризується наявністю нерегулярних поперечних та поздовжніх флуктуацій*. Рух атмосферного повітря практично завжди відбувається в турбулентному режимі. Пульсуючий потік, що проходить через деяку точку, можна представити у вигляді суперпозиції (накладення) різного розміру та інтенсивності вихорів. Великі атмосферні вихори зароджуються на мезомасштабному рівні і мають велику енергію. Вони викликані нерівномірним нагріванням земної поверхні. Ця енергія розсіюється потім у дрібніших вихорах під впливом в’язкості середовища. Активне турбулентне перемішування в повітряному середовищі сприяє передачі тепла та розсіюванню різних домішок в атмосфері. Для опису цих явищ вводяться

поняття коефіцієнтів турбулентного перенесення відповідної субстанції (*турбулентної дифузії*).

Теплоємність. Під теплоємністю середовища розуміють кількість тепла, необхідного для нагрівання одиниці маси речовини на один градус. Для газу оперують із поняттями теплоємностей при *постійному тиску* c_p та при *постійному об'ємі* c_v . У метеорології поняття теплоємності різних ділянок земної поверхні (суші та моря) використовуються для аналізу виникнення вітрових систем. Наприклад, вода має більш високу теплоємність, ніж тверді земні породи. Тому вона повільніше нагрівається та повільніше остигає. Земна ж поверхня прогрівається (влітку, вдень) швидше, ніж море, а (взимку та вночі) вона швидше остигає і стає холодніше за море. Це призводить до зміни напрямку вітру. Приземний вітер, як було зазначено раніше, завжди спрямований від холоднішої ділянки земної поверхні до теплішої.

Хімічні реакції. З хімічними реакціями доводиться мати справу при розгляді процесів горіння та інших технологічних процесів, при яких утворюються шкідливі атмосферні викиди. Крім того, речовини, що потрапляють в атмосферу, можуть також взаємодіяти між собою, утворюючи нові з'єднання.

При горінні *органічного палива* відбувається окислення вуглецю, водню, сірки, азоту та інших речовин. Окисли цих речовин, наприклад, CO , SO_2 , NO_2 , складають основу домішок, що надходять в атмосферу. Крім реакцій окиснення (горіння) у повітряному середовищі відбуваються десятки інших реакцій.

Дифузія. Під дифузією розуміють поширення речовини в якомусь середовищі в напрямку зменшення його концентрації.

Дифузія може відбуватися на молекулярному рівні, коли молекули речовини в результаті броунівського руху прагнуть до рівномірного розподілу у середовищі. Дифузійний масоперенос пропорційний градієнту концентрації. Розрізняють також турбулентну дифузію, що відбувається за рахунок турбулентного перемішування.

Полютанти та їх концентрація. Як було зазначено раніше, чисте атмосферне повітря складається в основному з азоту і кисню, а також деяких інших хімічних речовин, що становлять невелику масову частку. Серед них слід назвати, перш за все *пари води* та *вуглекислий газ*. Під впливом природних явищ (вулканічна діяльність, лісові пожежі тощо) і антропогенних факторів в атмосферу надходять не характерні для її складу речовини, які отримали узагальнену назву *полютантів*. В атмосферне середовище вони надходять у вигляді газів, рідких або твердих частинок, які називають *газоаерозолями*. Рівень забруднення атмосфери зазвичай характеризується їхньою об'ємною концентрацією, тобто масою шкідливої речовини в одиниці об'єму. Величину концентрації будемо позначати ϕ (мг/м^3), є головним шуканим параметром при математичному моделюванні процесів поширення забруднень у природному

середовищі. Процес поширення забруднень описується математичними співвідношеннями, головним з яких є рівняння турбулентної дифузії. Його також називають рівнянням *перенесення*, оскільки турбулентна дифузія, в більшості випадків, відбувається на основі вітрового потоку, який переміщує у просторі не тільки повітря, а й забруднюючі його речовини. У зв'язку з цим вживається термін «конвективна дифузія».

6.2 Основні рівняння конвективної дифузії

Під конвективною дифузією атмосферних забруднень будемо мати на увазі процес поширення забруднюючих домішок в атмосфері на основі механізмів конвекції (загальний рух повітряних мас, тобто вітер) і дифузії молекулярної або турбулентної (вирівнювання рівня концентрації забруднень у просторі та часі).

Для теоретичного опису та проведення розрахунків конвективної дифузії атмосферних забруднень необхідно побудувати математичну модель процесу, тобто описати фізичний процес конвективної дифузії за допомогою системи математичних рівнянь, які адекватно її відображають. Цей опис у загальному випадку може бути здійснено за способів Ейлера і Лагранжа. Вибір того чи іншого способу залежить від постановки завдання та мети, з якою проводяться розрахунки. Спосіб Лагранжа опису таких явищ призводить до широкого використання результатів статистичної теорії турбулентності. Спосіб Ейлера пов'язаний з використанням напівемпіричних теорій турбулентності для отримання замкнутої системи рівнянь математичної моделі конвективної дифузії. У *Лагранжовому* способі опису процесу конвективної дифузії поряд із *середніми швидкостями* перенесення частинок повітря та *дисперсіями компонент швидкості пульсації турбулентного руху*, необхідно знати *лагранжеві кореляційні функції* цих компонентів *пульсаційних швидкостей*, або їх *інтегральних масштабів*. Вимірювання цих характеристик в атмосфері – досить трудомісткий і складний процес.

Ейлерові характеристики виміри значно простіше. Тому на практиці, при описі атмосферної дифузії, перевага надається способу Ейлера, зокрема – для моделювання дифузії в атмосфері великих міст.

Надалі при побудові математичної моделі конвективної дифузії атмосферних забруднень будемо використовувати Метод Ейлера. Як зазначалося раніше, характер руху повітряних течій у нижніх шарах атмосфери турбулентний. Частки повітря рухаються невідповідно, хаотично, їх швидкості постійно схильні до пульсацій різної величини, тобто

$$\vec{V} = \vec{\bar{V}} + \vec{V}', \quad (6.7)$$

де $\bar{\vec{V}}$ – вектор, осередненої за деякий проміжок часу Δt , миттєвої швидкості руху частинки швидкості $\vec{V}$, $\vec{V}'$ – вектор пульсаційної швидкості.

Осереднення за часом відбувається так:

$$\bar{\vec{V}} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \vec{V} dt, \quad (6.8)$$

Аналогічні пульсації притаманні й іншим величинам, які характеризують стан турбулентної атмосфери: тиску p , температурі T , щільності ρ , вологості ν .

У всіх математичних моделях турбулентної атмосфери при використанні способу Ейлера, поля швидкості руху повітряних мас, поля їх тиску, температури, щільності, вологості визначаються як *осереднені поля* $(\bar{\vec{V}}, \bar{p}, \bar{T}, \bar{\rho}, \bar{\nu})$; а вплив пульсуючих полів відповідних величин визначається і враховується шляхом суттєвого збільшення імпульсу (турбулентне тертя), теплопровідності (турбулентна теплопровідності) і турбулентної вологості середовища, для опису яких використовуються напівемпіричні теорії турбулентності. З їхньою допомогою і замикається система математичних рівнянь.

Рух газової частинки в атмосфері відбувається під дією кількох сил:

1. *Сила баричного градієнта*

$$\vec{F}_p = -(\text{grad } \bar{p}) \cdot W_m, \quad (6.9)$$

де вектор-градієнт тиску береться зі знаком «мінус», оскільки напрям цього вектора протилежний напрямку вектора прискорення частинки $d\vec{V}/dt$ (частка рухається у бік зменшення тиску); W_m – об'єм газової частки.

Зазначимо, що тут і надалі під швидкістю турбулентного руху атмосферних повітряних мас $\vec{V}$ будемо мати на увазі її середнє значення $\bar{\vec{V}}$, відкинувши для спрощення запису позначення «рисочка». Це ж стосується всіх інших величин: тиску p , температурі T , щільності ρ , вологості ν .

2. *Сила тяжіння*

$$\vec{F}_g = m \cdot \vec{g}, \quad (6.10)$$

пропорційна прискоренню земного тяжіння $\vec{g}$, m – маса частинки газу, що рухається.

3. *Центробіжна сила*

$$\vec{F}_c = m \cdot \frac{V^2}{r}, \quad (6.11)$$

виникає при русі частинки по криволінійній траєкторії, вона прямо пропорційна квадрату швидкості руху і зворотно пропорційна радіусу кривизни траєкторії r .

4. *Сила тертя* $\vec{F}_{mp}$ виникає тільки в газі, що рухається, вона обумовлена зміною кількості руху (імпульсом) при переході частинки з однієї лінії струму на іншу і залежить від величини дотичної напруги тертя, а саме:

$$\tau = (\mu + \mu^T) \frac{d\vec{V}}{dn}, \quad (6.12)$$

Воно пропорційне зміні швидкості по нормалі до лінії струму $\frac{d\vec{V}}{dn}$. μ, μ^T – молекулярний і турбулентний динамічні коефіцієнти в'язкості (коефіцієнти обміну імпульсу). Під час руху газу вздовж земної поверхні відбувається уповільнення швидкості цього руху, обумовлене впливом сили тертя.

5. *Сила Коріоліса.*

$$\vec{F}_k = m \cdot [\vec{V} \times 2\vec{\omega}], \quad (6.13)$$

де $\vec{\omega}$ – кутова швидкість обертання Землі. Сила Коріоліса або відхиляюча сила обертання Землі змінює напрямок руху частинки повітря, якщо за нею спостерігати з поверхні планети. Ця сила має максимум на полюсах і перетворюється на нуль на екваторі. У нижніх шарах атмосфери сила Коріоліса значно менше, ніж сила тертя та її впливом у багатьох випадках можна знехтувати, але у верхніх шарах вона значно більша за силу тертя.

Таким чином, відповідно до другого закону Ньютона, рівняння руху атмосферної частинки масою m у загальному випадку можна записати у вигляді:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_p + \vec{F}_g + \vec{F}_c + \vec{F}_k + \vec{F}_{mp}, \quad (6.14)$$

якщо вважати, що об'єм частинки дорівнює одиниці, то рівняння (6.14) можна записати у вигляді:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_p + \vec{F}_g + \vec{F}_c + \vec{F}_k + \vec{F}_{mp}. \quad (6.15)$$

Слід зазначити, що з п'яти сил, які діють на частинку, причиною її руху є лише дві – сила баричного градієнта $\vec{F}_p$ та сила тяжкості $\vec{F}_g$, а центробіжна сила, сила Коріоліса і сила тертя – викривлюють або гальмують цей рух. Центробіжну силу $\vec{F}_c$ зазвичай враховують лише в завданнях, які пов'язані з описом циклонів і антициклонів, а в інших випадках вона несуттєва.

Якщо ввести до розгляду прямокутну праву декартову систему координат $Oxyz$, з центром у точці O на поверхні Землі, розташуванням осей Ox та Oy у площині земної поверхні і з віссю Oz , яка зорієнтована вертикально вгору, то вектор швидкості вітру $\vec{V}(x, y, z, t)$ можна представити вити у вигляді:

$$\vec{V}(x, y, z, t) = u(x, y, z, t) \cdot \vec{i} + v(x, y, z, t) \cdot \vec{j} + w(x, y, z, t) \cdot \vec{k}, \quad (6.16)$$

де u, v, w – компоненти швидкості вітру по осям координат $Oxyz$; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орти системи координат, t – час

Сила тяжіння $\vec{F}_g$ у цьому випадку задається у вигляді:

$$\vec{F}_g = -\rho \vec{g} \cdot \vec{k} = -\gamma \vec{k}, \quad (6.17)$$

де $g = 9,81, \text{ м/с}^2$ – прискорення земного тяжіння; $\gamma = \rho \vec{g}$ – питома вага повітря.

Сила Коріоліса записується так:

$$\vec{F}_k = \left[(f \cdot v) \vec{i} - (f_1 \cdot w + f \cdot u) \vec{j} + (f_1 \cdot v) \vec{k} \right] \cdot \rho, \quad (6.18)$$

де $f = 2\omega_0 \sin \alpha$, $f_1 = 2\omega_0 \cos \alpha$, $1/\text{с}$; α – географічна широта, на якій знаходиться розглянута точка ($\alpha = 0^\circ$ на екваторі, $\alpha = 90^\circ$ на полюсі).

Якщо коефіцієнти динамічної в'язкості μ, μ^T – постійні величинами, то силу тертя $\vec{F}_{mp}$ можна представити у вигляді:

$$\vec{F}_{mp} = (\mu + \mu^T) (\nabla^2 u \cdot \vec{i} + \nabla^2 v \cdot \vec{j} + \nabla^2 w \cdot \vec{k}), \quad (6.19)$$

де $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – диференціальний оператор Лапласа.

Проте, в теорії атмосферних течій коефіцієнт турбулентної в'язкості не є постійною величиною. У загальному вигляді динамічний коефіцієнт турбулентної в'язкості μ^T є функцією координат, часу і залежить від стану атмосфери.

Нехтуючи центробіжною силою $\vec{F}_c$, як силою, яка має обмежене застосування, векторне рівняння (6.15) може бути записано у проекціях на осі декартової системи координат у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_v + \frac{1}{\rho} \nabla_u^2(u): \\ \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - (f_1 \cdot w + f \cdot u) + \frac{1}{\rho} \nabla_v^2(v); \\ \frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f_1 v - g + \frac{1}{\rho} \nabla_w^2(w): \end{cases} \quad (6.20)$$

До системи рівнянь (6.20) необхідно додати рівняння неперервності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w), \quad (6.21)$$

і рівняння стану середовища (рівняння стану досконалого газу)

$$p = \rho R T, \quad (6.22)$$

де R – газова стала.

На характер атмосферних процесів значно впливає температура повітря. Від того, як розподілена температура повітря в атмосфері, тобто, від атмосферного температурного поля залежить швидкість і напрям вітру, атмосферний тиск, характер протікання фізичних (випаровування та конденсація рідини) та хімічних процесів. Використовуючи закон збереження енергії можна отримати рівняння балансу тепла в атмосфері у вигляді:

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \rho L^* \cdot \Phi + Q_r + \nabla_T^2(T) + \dot{Q}_T, \quad (6.23)$$

де C_p – питома теплоємність повітря за постійного тиску; L^* – приховане питоме тепло випаровування (пароутворення) або конденсації; Φ – швидкість утворення рідкої фази; Q_r – радіаційний доданок припливу тепла; $\dot{Q}_T$ – приплив тепла, що відбувається за рахунок внутрішніх джерел (стоків).

$$\nabla_T^2(T) = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda + \lambda^T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\lambda + \lambda^T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\lambda + \lambda^T) \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad (6.24)$$

λ, λ^T – молекулярний та турбулентний коефіцієнти теплопровідності (коефіцієнти молекулярного та турбулентного обміну тепла).

У повітрі, навіть у спекотну погоду, утримується значна кількість вологи, постійно відбуваються процеси пароутворення та конденсації, випадають опади. З цих причин визначення розподіленої вологості (поля вологості) в атмосфері є одним з найважливіших завдань метеорології та екології. Використовуючи

закон збереження маси вологості, можна отримати рівняння балансу вологи в атмосфері у вигляді:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\rho \cdot \Phi + \nabla_v^2(v) + \dot{Q}_v, \quad (6.25)$$

де v – питома (на одиницю маси) вологість повітря; $\dot{Q}_v$ – приток вологості за рахунок внутрішніх джерел (стоків).

$$\nabla_v^2(v) = \frac{\partial}{\partial x} \left[(D_v + D_v^T) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(D_v + D_v^T) \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(D_v + D_v^T) \frac{\partial v}{\partial z} \right], \quad (6.26)$$

де D_v , D_v^T – молекулярний та турбулентний коефіцієнти дифузії вологості (коефіцієнти молекулярного та турбулентного обміну вологості). Таким чином, система рівнянь турбулентної атмосфери включає рівняння (6.20) – (6.26). У ній залишаються невідомими коефіцієнти турбулентного обміну кількості руху, тепла та вологості – μ^T , λ^T , D_v^T . При Ейлеровому описі процесів у турбулентній атмосфері для замикання системи рівнянь (6.20) – (6.26) використовуються напівемпіричні моделі різного рівня складності. Таких моделей багато, але на практиці найчастіше використовують найпростіші з них – модель шляху змішування Прандтля, яка базується на понятті турбулентної в'язкості та турбулентної теплопровідності, запропонованих Бусінськом.

У моделі шляху змішування Прандтля передбачено лінійну залежність коефіцієнта турбулентності в'язкості μ^T від градієнта осередненої течії над поверхнею $z = 0$.

Для односпрямованої течії вона має вигляд:

$$\mu^T = \rho \cdot l^2 \cdot \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|, \quad (6.27)$$

де $l = N \cdot z$, де $N = 0.4$ – стала Кармана, l – шлях перемішування.

$$\left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| = \frac{u^*}{N \cdot z}, \quad (6.28)$$

де $u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ – швидкість зсуву або швидкість тертя.

Відповідно до (6.28) вираз (6.27) набуває виду:

$$\mu^T = \rho \cdot N \cdot u^* \cdot z. \quad (6.29)$$

Значення величини u^* змінюється в межах: $u^* = (0,2 \div 0,8)$ м/с.

Що стосується коефіцієнтів турбулентної теплопровідності λ^T та турбулентної дифузії вологості D_v^T , то вони вважаються пропорційним коефіцієнтом турбулентної в'язкості μ^T .

$$\lambda^T = D_v^T = \frac{\mu^T}{Pr^T}, \quad Pr^T = \frac{\mu^T \cdot C_p}{\lambda^T}, \quad (6.30)$$

де Pr^T – турбулентне число Прандтля.

Для течії стратифікованої атмосфери довжина шляху перемішування l залежить від характеру температурної стратифікації:

$$l = l_0 \cdot (1 - \beta_1 \cdot R_i), \quad l = l_0 \cdot (1 - \beta_2 \cdot R_i)^{-0,25}, \quad l_0 = N \cdot z, \quad (6.31)$$

де β_1, β_2 – константи, R_i – параметр Річардсона, який характеризує стан атмосфери (стійкий, нестійкий та нетривалий). Співвідношення (6.29) – (6.31), замикають систему рівнянь (6.20) – (6.26). Для вирішення цієї системи необхідно задати вихідні та граничні умови.

Початкові умови пов'язані з тим, що на момент часу $t = 0$, задано початкові профілі всіх шуканих величин:

$$u = u_0(x, y, z), \quad v = v_0(x, y, z), \quad w = w_0(x, y, z), \quad T = T_0(x, y, z), \quad \nu = \nu_0(x, y, z), \quad \nu = \nu_0(x, y, z), \quad \text{коли } t = 0. \quad (6.32)$$

Граничні умови під час вирішення конкретних завдань можуть бути різними. Суттєвий вплив на визначення граничних умов має рельєфна, температурна та волога неоднорідність підстилаючої поверхні Землі. Наявність на поверхні глибоких впадин, високих пагорбів та гірських масивів значно ускладнюють постановку та вирішення конкретних завдань. Якщо вирішуються завдання, пов'язані з атмосферою великого міста, то необхідно врахувати, що на території міста можуть бути розташовані ділянки поверхні з підвищеною температурою та вологістю (теплотраси, промислові підприємства, ТЕЦ, штучні та природні водойми). Усе це ускладнює встановлення конкретних граничних умов, вимагає залучення експериментальних даних.

Але в багатьох практично важливих випадках можна вважати, що далеко від міської території, при $x^2 + y^2 \rightarrow \infty$ підстильна поверхня відносно однорідна і це призводить до вирівнювання шуканих величин, окремо, по горизонтальним координатам, тобто:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial \nu}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial \nu}{\partial y} = 0; \end{aligned} \quad , \quad x^2 + y^2 \rightarrow \infty. \quad (6.33)$$

При $z \rightarrow \infty$ необхідно враховувати той факт, що на висотах більше $z \sim (1,0 \div 1,5)$ км починається зона геострофічного вітру, який виникає під дією сили баричного градієнта $\bar{F}_p$ і сили Коріоліса $\bar{F}_k$. Тому на верхній межі області для розв'язання задачі необхідно задавати умови, що відповідають зоні геострофічного вітру:

$$\begin{aligned} u &= u_g(x, y, t), v = v_g(x, y, t), w = 0, \\ p &= p_g(x, y, t), \rho = \rho_g(x, y, t), \quad , z \rightarrow \infty. \\ T &= T_g(x, y, t); \nu = \nu_g(x, y, t), \end{aligned} \quad (6.34)$$

Тут індексом «g» позначені шукані фізичні величини в зоні геострофічного вітру. Іноді для компонентів швидкості вітру використовується умова:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad z \rightarrow \infty. \quad (6.35)$$

На поверхні землі граничні умови ставляться не для $z=0$, а для, де $z = z_0 \neq 0$, де $z = z_0 \neq 0$ висота шорсткості поверхні, яка в різних випадках може бути різною і залежати від характеру рослинного покриву та величини міських будівель.

Для компонентів швидкості маємо:

$$u = v = w = 0, \quad z \rightarrow \infty, \quad (6.36)$$

а для температури та вологості – умови теплового балансу та балансу вологості:

$$\begin{cases} \Phi_{\Gamma} - C_p \cdot \left(\frac{\mu^T}{Pr^T} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) - L^* \cdot \left(\frac{\mu^T}{Pr^T} \cdot \frac{\partial \nu}{\partial z} \right) = \bar{R} + \dot{I}_T; \\ \nu = \eta_0 \cdot \left[\frac{0,622 \cdot E_0(T_0)}{p_0} \right] + \dot{I}_\nu, \quad z = z_0. \end{cases}, \quad (6.37)$$

де Φ_{Γ} – притікання (приплив) тепла в ґрунті; $\bar{R}$ – радіаційний баланс поверхневої структури (баланс поглинання та відображення сонячного випромінювання); η_0 – відносна вологість на поверхні ґрунту (емпіричний коефіцієнт); T_0 , p_0 – температура і тиск при $z=z_0$; $E_0(T_0)$ – потужність насичення водної пари при температурі T_0 і тиску p_0 ; $\dot{I}_T$, $\dot{I}_\nu$ – потоки тепла та вологості від штучних джерел на поверхні ґрунту. Зазначимо, що на поверхні природних або штучних водойм $\eta_0 = 1$, $\dot{I}_\nu = 0$.

Система нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних (6.20)

– (6.26), де $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$, разом із разом із співвідношеннями (6.29)

– (7.31), початковими та граничними умовами (6.32) – (6.37) представляють собою **математичну модель** руху повітряних мас в турбулентній атмосфері, тобто на тих висотах, де фактор турбулентності значний і помітним виявляється вплив підстилаючої поверхні Землі. Ця зона висотою $H \sim (1,0 \div 1,5)$ км називається прикордонним шаром атмосфери Землі. Вище починається зона геострофічного вітру та великомасштабних вихрових течій, де зазначена математична модель не працює. У багатьох практично важливих випадках систему (6.20) – (6.26) можна суттєво спростити. В дійсності, якщо вважати, що рельєф поверхні є відносно однорідним (без помітних впадин і височин), то в прикордонному шарі атмосфери вертикальні градієнти швидкості, температури і вологості помітно перевищуватимуть горизонтальні, тобто

$$\frac{\partial}{\partial z}() > \left[\frac{\partial}{\partial x}(); \frac{\partial}{\partial y}() \right],$$

а вертикальна дифузія буде більшою, ніж горизонтальна

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu^T) \frac{\partial}{\partial z} \right] > \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu^T) \frac{\partial}{\partial x} \right]; \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu^T) \frac{\partial}{\partial y} \right] \right].$$

Вертикальна складова швидкості w – буде значно менше ніж горизонтальні складові $w \ll u$; $w \ll v$.

Якщо при цьому вважати, що щільність повітря в прикордонному шарі атмосфери мало змінюється в залежності від висоти, а швидкості вітру значно менше швидкості звуку, і температурні перепади помірні, то густину повітря в цьому шарі можна вважати величиною постійною, тобто

$$\rho \approx \rho_{cp} = const. \quad (6.38)$$

Молекулярною в'язкістю μ , радіаційним припливом тепла Q_r , припливом тепла від фазових перетворень та впливом сили Коріоліса на вертикальні потоки повітря в розрахунках, як правило, нехтують, тобто вважають, що

$$\mu = Q_r = \Phi = f_1 = 0. \quad (6.39)$$

У цьому випадку система рівнянь прилежового шару атмосфери (6.20) – (6.26) набуває вигляду:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f \cdot v + \frac{\partial}{\partial z} (v^T \cdot \frac{\partial v}{\partial z}); \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - f \cdot u + \frac{\partial}{\partial z} (v^T \cdot \frac{\partial v}{\partial z}); \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= -\rho \cdot g; \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} (\frac{v^T}{Pr^T} \cdot \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{\dot{Q}_T}{\rho C_p}; \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} (\frac{v^T}{Pr^T} \cdot \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\dot{Q}_v}{\rho}. \end{aligned} \right. \quad (6.40)$$

де v^T – кінематичний коефіцієнт турбулентної в'язкості.

У прикордонному шарі атмосфери виділяють **нижній приземний шар** висотою $0 \leq h \leq (50 \div 100)$ м, який характеризується стабільністю вертикальних потоків кількості руху, тепла та вологості:

$$v^T \cdot \frac{\partial u}{\partial z} = u_*^2 = const, \quad \frac{v^T}{Pr^T} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = const, \quad \frac{v^T}{Pr^T} \cdot \frac{\partial v}{\partial z} = const. \quad (6.41)$$

Відбувається така різка зміна профілів швидкості, температури та вологості зі зміною висоти. Дослідженнями встановлено, що коефіцієнт турбулентної в'язкості $v^T(z)$ лінійно змінюється з висотою саме в межах приземного шару $0 \leq z \leq h$, а при $z > h$ він майже не змінюється, і в розрахунках його можна прийняти рівним:

$$v^T(z) = \begin{cases} N \cdot u \cdot z, & 0 \leq z \leq h; \\ N \cdot u \cdot h, & z > h. \end{cases} \quad (6.42)$$

Чисельні інтегрування систем рівнянь (6.21) – (6.26) або (6.38) при початкових та граничних умовах (6.32) – (6.37) разом із співвідношеннями (6.29) – (6.31), (6.42) дає можливість визначити поле швидкостей вітру, поле температур та поле вологості в прикордонному шарі турбулентної атмосфери. Припустимо, що в деякій точці $M_0(x_0, y_0, z_0)$ знаходиться джерело викидів забруднюючої домішки з інтенсивністю q , кг/с або q , м³/с, наприклад, заводська труба. Забруднена домішка, яка потрапила в атмосферу, що поширюється в просторі конвективно вздовж траєкторії частинок повітря під дією вітру, а також дифузійно, під дією механізмів молекулярної та турбулентної дифузії. В атмосфері частинки домішки можуть вступати у фізико-хімічні перетворення та

трансформації зі швидкістю σ , 1/с. Позначимо через φ , кг/м³ об'ємну концентрацію домішки в атмосфері. Тоді, згідно диференціальне рівняння, яке описує процес перенесення та дифузії домішки в турбулентній атмосфері у загальному випадку має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} (v_x^T \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (v_y^T \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z^T \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z}) - \sigma \cdot \varphi + q^* \end{aligned} \quad (6.42)$$

де v_x^T , v_y^T – горизонтальні кінематичні коефіцієнти турбулентної дифузії, а v_z^T – вертикальний кінематичний коефіцієнт турбулентної дифузії; w_g – швидкість осідання важкої домішки (наприклад, пилу) під дією сили гравітації (для легкої аерозольної домішки $w_g = 0$). Зазначимо, що концентрація забруднюючої домішки $\varphi(x, y, z, t)$ у турбулентному потоці повітря – середня величина; q^* , кг/м³ – сумарне притікання маси домішки за рахунок дії всіх джерел забруднення.

Якщо поле швидкості вітру $V(u, v, w)$ відоме, то рівняння (6.42) є лінійним диференціальним рівнянням другого порядку параболічного типу. Для інтегрування цього рівняння необхідно задати початкові та граничні умови.

Початкова (вихідна) умова в момент часу $t=0$ задається у вигляді початкового просторового розподілу концентрації:

$$\varphi = \varphi_0(x, y, z), \quad t = 0. \quad (6.43)$$

Граничні умови повинні задаватися так, щоб рішення крайової задачі було єдиним. Ставляться наступні граничні умови:

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_s, & \Gamma, \quad V_n < 0; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0, & \Gamma, \quad V_n \geq 0. \end{cases} \quad (6.44)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \alpha \cdot \varphi \quad \text{для } z = z_0 \text{ – рівняння шорсткості.}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 \quad \text{для } z = H, \quad \varphi = 0 \quad \text{для вагової домішки.}$$

Γ – бічна границя замкнутої просторової зони поширення домішки; $\vec{n}$ – вектор одиничної зовнішньої нормалі до межі Γ ; V_n – перпендикулярна до межі Γ складова швидкості вітру, $\alpha = \lambda / v_z^T$, λ , м/с – швидкість поглинання домішки підстилаючою поверхнею Землі; $z = H$ – верхня межа поширення домішки.

Для багатьох задач можна взяти $H = \infty$. У випадку необмеженої області переносу домішки (відсутність межі Γ) в якості граничної умови задається:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0, \quad x^2 + y^2 \rightarrow \infty. \quad (6.45)$$

Коефіцієнти турбулентної дифузії ν_x^T , ν_y^T , ν_z^T , які входять до рівняння (6.42) визначаються за допомогою емпіричних моделей різного типу. У приземному шарі $z \leq h$ можна вирахувати ці коефіцієнти за формулами:

$$\nu_x^T = \nu_y^T = K_0 \cdot u(x, y, z); \quad \nu_z^T = \left(\frac{z}{z_1} \right)^P, \quad (6.46)$$

де $z_1 = 1$ м, $K_0 = 0,1 \div 1,0$ м; $K_1 = 0,1 \div 0,2$ м²/с; $P = 0,8 \div 1,2$, в залежності від стійкості атмосфери. Для випадку вище ніж у приземному шарі можна прийняти:

$$\nu_x^T = \nu_y^T = \nu_z^T = K_1 \cdot \left(\frac{h}{z_1} \right)^P. \quad (6.47)$$

Розміщення джерела викидів забруднень та характер їх розміщення у просторі можуть бути досить різноманітними. Класифікують точкові джерела (заводські труби) з інтенсивністю викидів q , кг/с, лінійні джерела (автотраси) з інтенсивністю q_l , кг/(м·с) та площинні джерела (сміттєзвалища, території підприємств) з інтенсивністю q_s , кг/(м²·с). У загальній математичній моделі конвективної дифузії атмосферних забруднень всі види точкових викидів замінюються системою у вигляді дельта функцій Дірака $\delta(\vec{r} - \vec{r}_0)$, де $\vec{r}$ – радіус-вектор потокової точки простору, $\vec{r}_0$ – радіус-вектор точки місцезнаходження джерела викиду. Отже, в загальному випадку за наявності великої кількості джерел забруднень інтенсивністю q_i , у рівнянні (6.42) маємо:

$$q^* = \sum_{i=1}^{NN} q_i(t) \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}_i(t)). \quad (6.48)$$

В окремих випадках зручно використовувати рівняння конвективної дифузії у спрощеній постановці, тобто без урахування температурних полів і рівня вологості атмосфери.

У випадку рівноваги повітряного середовища виконуються умови термодинамічної рівноваги:

- відсутні макроскопічні рухи;
- температура T та тиск p постійні.

Вважатимемо, що порушення рівноваги в середовищі пов'язане зі зміною концентрації від точки до точки та з наявністю в ній макроскопічного (конвективного) руху. Припускаємо температуру суміші постійною, а градієнт тиску досить малим.

Таким чином, перенесення речовини в середовищі, що рухається, обумовлене лише двома різними механізмами:

- по-перше, зважені газоаерозольні частинки захоплюються середовищем і переносяться разом з нею;
- по-друге, за наявності різниці концентрацій у середовищі виникає молекулярна та турбулентна дифузія.

Сукупність обох процесів називають *конвективною дифузією речовини* в аналізованому повітряному або рідкому середовищі.

Запишемо диференціальне рівняння, що описує дифузійне перенесення речовини в стаціонарному і ламінарному середовищі, що рухається, без виведення.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\operatorname{div}(D \operatorname{grad} \varphi) + Q. \quad (6.49)$$

У прямокутній декартовій системі координат рівняння конвективної дифузії в середовищі, що ламінарно рухається, запишеться наступним чином:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} + \frac{\partial v \varphi}{\partial y} + \frac{\partial w \varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + Q, \quad (6.50)$$

де u, v, z – відповідні компоненти швидкості рухомого суцільного середовища, які в загальному випадку є функціями координат і повинні бути визначені з гідродинамічної задачі; D_x, D_y, D_z – коефіцієнти молекулярної дифузії у відповідних напрямках.

Можна виконати перетворення:

$$\operatorname{div}(\vec{V} \cdot \varphi) = \vec{V} \operatorname{grad} \varphi + \varphi \cdot \operatorname{div} \vec{V}. \quad (6.51)$$

В силу стискання середовища $\operatorname{div} \vec{V} = 0$. Тоді рівняння для концентрації набуває вигляду:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \vec{V} \operatorname{grad} \varphi = \operatorname{div}(D \operatorname{grad} \varphi) + Q, \quad (6.52)$$

або

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi}{\partial y} + w \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + Q, \quad (6.53)$$

Узагальним тепер рівняння для випадку турбулентного руху середовища. Представимо концентрацію речовини та швидкість вітру у вигляді суми осередненого значення та малих пульсаційних складових:

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi', u = \bar{u} + u', v = \bar{v} + v', w = \bar{w} + w', \quad (6.54)$$

Осередненні складові обчислюються за формулами:

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \varphi dt, \quad \bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u dt, \quad \bar{v} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} v dt, \quad \bar{w} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} w dt, \quad (6.55)$$

$$\bar{\varphi}' = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \varphi' dt, \quad \bar{u}' = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u' dt, \quad \bar{v}' = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} v' dt, \quad \bar{w}' = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} w' dt, \quad (6.55)$$

Підставляючи (6.54) у (6.50) та інтегруючи отримане рівняння на інтервалі від t до $t+\Delta t$, отримаємо рівняння турбулентної дифузії:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} \bar{\varphi}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} \bar{\varphi}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w} \bar{\varphi}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial z}) - \\ - \frac{\partial \bar{u}' \bar{\varphi}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}' \bar{\varphi}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}' \bar{\varphi}'}{\partial z} + \bar{Q} \end{aligned} \quad (6.56)$$

Кореляційні моменти між пульсаціями швидкості та концентрації $\overline{v' \varphi'}$ характеризують додатковий турбулентний перенесення речовини. Відповідно до напівемпіричної моделі турбулентності вважають, що турбулентний потік речовини в i -му напрямку дорівнює

$$J_{ti} = -\overline{v'_i \varphi'} = D_{ti} \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x_i}, \quad (6.57)$$

де D_{ti} - коефіцієнт турбулентної дифузії, що характеризує відношення потоку домішки до градієнта концентрації. Оскільки для більшості газів коефіцієнт молекулярної дифузії становить $0,1 \div 1 \text{ см}^2/\text{с}$, а значення коефіцієнта турбулентної дифузії знаходиться в межах $10^{-4} \div 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ у більшості випадків молекулярним переносом нехтують:

$$\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{tx} \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_{ty} \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_{tz} \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial z}) + \bar{Q}. \quad (6.58)$$

Надалі, індекс t коефіцієнта турбулентної дифузії та рисочки осереднення будуть опускатися.

Отже, конвективна дифузія описується рівнянням в часткових похідних другого порядку зі змінними коефіцієнтами. Для його вирішення необхідно знати розподіл речовини в області, що розглядається в початковий момент часу (початкова умова), геометрію аналізованої області (безмежний,

напівобмежений чи обмежений простір) і закон взаємодії досліджуваної домішки з граничною поверхнею (гранична умова). Початкова умова записується в наступному вигляді:

$$\varphi(x, y, z, t)|_{t=0} = f(x, y, z), \quad (6.59)$$

де $f(x, y, z)$ – відома функція координат.

В якості граничної умови на нескінченності задають, що концентрація при віддаленні від джерела прямує до фонового значення φ_0 або до нуля.

$\varphi = \varphi_0$, коли $l \rightarrow \infty$, l – відстань до джерела.

На граничній поверхні умови виглядають складнішими. При заданні концентрації речовини на граничній поверхні S в будь-який момент часу маємо граничну умову першого роду:

$$\varphi(x, y, z, t)|_S = f_S(x^S, y^S, z^S, t), \quad (6.60)$$

В окремому випадку, концентрація протягом усього процесу підтримується постійною ($\bar{\varphi}|_S = \text{const}$) або дорівнює нулю ($\bar{\varphi}|_S = 0$)

Гранична умова другого роду полягає у завданні щільності потоку речовини на граничну поверхню як функції часу:

$$-D_n \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_S = \mu_S(x^S, y^S, z^S, t), \quad (6.61)$$

Найпростіший випадок однорідної граничної умови другого роду полягає у сталості потоку речовини на поверхню:

$$-D_n \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_S = \mu = \text{const}. \quad (6.62)$$

При дослідженні поширення газоаерозольних домішок в атмосфері, вважають, що на поверхні землі виконується умова відбиття (потік речовини на поверхні дорівнює нулю):

$$-D_n \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_S = 0. \quad (6.63)$$

На водній поверхні зазвичай задають умову поглинання домішки:

$$\varphi|_S = 0. \quad (6.64)$$

Більш загальний випадок часткового поглинання потоку домішки на границі описується граничною умовою третього роду:

$$\left(-D_n \frac{\partial \varphi}{\partial n} + \beta \cdot \varphi \right)|_S = 0, \quad (6.65)$$

де β – параметр взаємодії домішки з граничною поверхнею.

6.3 Питання для самоконтролю

1. Що таке *дифузія*?
2. Що таке *теплоємність*?
3. Пояснити поняття *турбулентності*.
4. Пояснити поняття *ламінарного руху*.
5. Назвати рівняння *стану досконалого газу* та пояснити його складові.
6. Назвати рівняння *збереження масової витрати* рідини та пояснити його складові.
7. Назвати рівняння *збереження об'ємної витрати* рідини та пояснити його складові.
8. Назвати рівняння *неперервності* та пояснити його складові.
9. Що визначає початкова та гранична умови? Навести приклади таких умов при розрахунку поля концентрації шкідливих домішок.
10. Що таке крайові умови і які вони бувають при розрахунку поля концентрації шкідливих домішок?
11. Охарактеризувати сили, під дією яких відбувається рух газової частинки

6.4 Тестові завдання

Тест 6. Теоретичні основи розрахунку рівня забруднення атмосфери

1. Вказати закон збереження маси.
 - а) $Q_m = \rho \cdot V \cdot S$ ☐;
 - б) $Q = V \cdot S$ ☐;
 - в) $Q_m = \frac{m \cdot V^2}{2}$ ☐;
 - г) $Q_m = mgh$ ☐.
2. Вказати рівняння стану (модель досконалого газу)
 - а) $p = RT$ ☐;
 - б) $p = \rho RT$ ☐;
 - в) $p = mRT$ ☐;
 - г) $p = VRT$ ☐.
3. Що таке теплоємність середовища?
 - а) поширення речовини в якомусь середовищі в напрямку зменшення його концентрації ☐;
 - б) наявністю нерегулярних поперечних та поздовжніх флуктуацій ☐;
 - в) кількість тепла, необхідне для нагрівання одиниці маси ☐.

речовини на один градус

г) стійкий рух без перемішування шарів

☐.

4. Що таке дифузія?

а) поширення речовини в якомусь середовищі в напрямку зменшення його концентрації

☐.

б) наявністю нерегулярних поперечних та поздовжніх флуктуацій

☐.

в) кількість тепла, необхідне для нагрівання одиниці маси речовини на один градус

☐.

г) стійкий рух без перемішування шарів

☐.

5. Що таке турбулентний рух?

а) поширення речовини в якомусь середовищі в напрямку зменшення його концентрації

☐.

б) наявністю нерегулярних поперечних та поздовжніх флуктуацій

☐.

в) кількість тепла, необхідне для нагрівання одиниці маси речовини на один градус

☐.

г) стійкий рух без перемішування шарів

☐.

6. Що таке ламінарний рух?

а) поширення речовини в якомусь середовищі в напрямку зменшення його концентрації

☐.

б) наявністю нерегулярних поперечних та поздовжніх флуктуацій

☐.

в) кількість тепла, необхідне для нагрівання одиниці маси речовини на один градус

☐.

г) стійкий рух без перемішування шарів

☐.

7. Вказати *силу баричного градієнта*?

а) $\vec{F}_g = m \cdot \vec{g}$

☐.

б) $\vec{F}_p = -(\text{grad } \bar{p}) \cdot W_m$

☐.

в) $\vec{F}_c = m \cdot \frac{V^2}{r}$

☐.

г) $\vec{F}_k = m \cdot [\vec{V} \times 2\vec{\omega}]$

☐.

8. Вказати *центробіжну силу*?

а) $\vec{F}_g = m \cdot \vec{g}$

☐.

б) $\vec{F}_p = -(\text{grad } \bar{p}) \cdot W_m$ ☐;

в) $\vec{F}_c = m \cdot \frac{V^2}{r}$ ☐;

г) $\vec{F}_k = m \cdot [\vec{V} \times 2\vec{\omega}]$ ☐.

9. Вказати *силу Копіоліса*?

а) $\vec{F}_g = m \cdot \vec{g}$ ☐;

б) $\vec{F}_p = -(\text{grad } \bar{p}) \cdot W_m$ ☐;

в) $\vec{F}_c = m \cdot \frac{V^2}{r}$ ☐;

г) $\vec{F}_k = m \cdot [\vec{V} \times 2\vec{\omega}]$ ☐.

10. Вказати вираз, що визначає коефіцієнт турбулентної в'язкості.

а) $\mu^T = \rho \cdot l^2 \cdot \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|$ ☐;

б) $\mu^T = m \cdot l^2 \cdot \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|$ ☐;

в) $\mu^T = V \cdot l^2 \cdot \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|$ ☐;

г) $\mu^T = \rho \cdot l^2 \cdot \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right|$ ☐.

11. Що визначає початкова умова для визначення поля концентрації?

а) значення функції концентрації на границях розрахункової області ☐;

б) значення функції концентрації в початковий момент часу ☐;

в) значення функції концентрації на непроникній поверхні ☐;

г) все перелічене вище ☐.

12. Що визначають граничні умови для визначення поля концентрації?

а) значення функції концентрації на границях розрахункової області ☐;

б) значення функції концентрації в початковий момент часу ☐;

в) значення функції концентрації на непроникній поверхні ☐;

г) все перелічене вище ☐.

13. Що включають в себе крайові умови для визначення поля концентрації?

- а) значення функції концентрації на границях розрахункової області ☐;
б) значення функції концентрації в початковий момент часу ☐;
в) значення функції концентрації на непроникній поверхні ☐;
г) все перелічене вище ☐.

14. Що означає умова непроникності (непротікання)?

- а) швидкість постійна ☐;
б) градієнт швидкості постійний ☐;
в) зміна швидкості по нормалі до поверхні дорівнює нулю ☐;
г) інша відповідь ☐.

15. Які умови виконуються при термодинамічній рівновазі?

- а) відсутні макроскопічні рухи ☐;
б) температура T постійна ☐;
в) тиск p постійний ☐;
г) все перелічене вище ☐.

7. ПРАКТИЧНА РОБОТА 1

Дослідження особливостей поширення забруднення від постійно діючого точкового джерела в одновимірному наближенні

Мета роботи: дослідження впливу параметрів стану атмосферного повітря на розподіл концентрації забруднення у випадку постійно діючого точкового джерела.

7.1 Постановка завдання

У загальному випадку ступінь поширення забруднення в атмосфері описують нестационарним рівнянням перенесення:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial(u\varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(v\varphi)}{\partial y} + \frac{\partial(w\varphi)}{\partial z} + \sigma\varphi = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \sum_{i=1}^n Q_i \delta(x - x_{0i}, y - y_{0i}, z - z_{0i}, t). \quad (7.1)$$

У цьому рівнянні φ – інтенсивність забруднення, [кг/м³]; x, y, z – координати точки спостереження, м; t – час, [с]; u, v, w – компоненти вектора

швидкості вітру, [м/с]; σ – коефіцієнт нейтралізації забруднення; μ – коефіцієнт турбулентної дифузії атмосфери; Q_i – потужність i -го точкового джерела забруднень, [кг/с]; x_{0i}, y_{0i}, z_{0i} – координати точкового джерела; $\delta(x - x_{0i}, y - y_{0i}, z - z_{0i}, t)$ – дельта-функція Дірака.

Зауваження 1. Якщо знехтувати математичною строгістю у визначенні дельта-функції Дірака $\delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0)$, то в межах даної роботи достатньо скористатися такими її властивостями:

- 1) значення цієї функції дорівнюють нулю в усіх точках простору, крім однієї точки (x_0, y_0, z_0) ;
- 2) у зазначеній точці дана функція набуває нескінченно великого значення;
- 3) інтеграл $\int \delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0) dx dy dz$ по всьому простору дорівнює одиниці.

У даній роботі розглядатимемо значне спрощення математичної моделі, яке дозволяє отримати прості аналітичні залежності. Математичні спрощення рівняння (7.1) можливі за таких умов:

- розглянемо стаціонарний процес поширення забруднення;
- виберемо одновимірну модель такого процесу;
- візьмемо незмінними величинами параметри переносу: швидкість вітру, коефіцієнти дифузії і нейтралізації.

У такому спрощенні рівняння (1.1) для концентрації забруднення φ набуде вигляду

$$u \frac{d\varphi}{dx} + \sigma \varphi = \mu \frac{d^2 \varphi}{dx^2} + Q \delta(x - x_0), \quad (7.2)$$

де u – швидкість вітру, збігається за напрямом з віссю Ox , [м/с]; σ – коефіцієнт нейтралізації, [1/с]; μ – коефіцієнт дифузії, [м²/с]; Q – інтенсивність точкового джерела, [кг/с]; $\delta(x - x_0)$ – дельта-функція Дірака.

Рівняння (7.1) розглядаємо на всій осі Ox за умови, що у разі $\sigma \neq 0$ концентрація забруднення на нескінченності, тобто при $x \rightarrow \pm\infty$, наближається до нуля.

Зауваження 2. Необхідно розуміти, в якому випадку одновимірне наближення виходить із загальної просторової задачі (7.1). Розмірковуватимемо таким чином: у просторі існує площа, квадратний метр якої створює за

секунду Q кг домішок, (Q , [кг/(с*м²)], $Q = \text{const}$). Така площа («створюваний фронт») розміщена перпендикулярно координатній осі Ox у точці $x=x_0$. Перенесення забруднень, вироблених вказаною площиною, відбуватиметься тільки вздовж осі Ox (уздовж повітряного потоку). У такому випадку немає факторів, здатних змінити концентрацію забруднень у напрямках, перпендикулярних осі Ox . Тому можна припустити, що функції φ та δ залежать тільки від координати x .

У такому наближенні δ -функцію можна виразити рівністю

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x - x_0) dx = 1.$$

7.2 Завдання до практичної роботи

1. Знайти неперервне аналітичне розв'язання рівняння з урахуванням необхідної поведінки розв'язку на нескінченності (7.2).
2. Розрахувати розподіл концентрації забруднення на заданій ділянці $[a, b]$ для різних значень швидкості вітру за умови розміщення джерела забруднення на ділянці $[a, b]$, тобто в точці $x_0 \in [a, b]$.
3. Розрахувати графік залежності $\varphi(x)$ і проаналізувати поширення забруднення за напрямом вітру і проти нього.
4. Проаналізувати вплив швидкості вітру, коефіцієнтів дифузії і нейтралізації на розподіл забруднення.
5. Знайти аналітичне розв'язання задачі у випадку нульового значення коефіцієнтів нейтралізації та дифузії.

7.3 Аналітичне розв'язання

Рівняння для розподілу концентрації забруднення має вигляд

$$u \frac{d\varphi}{dx} + \sigma\varphi = \mu \frac{d^2\varphi}{dx^2} + Q\delta(x - x_0). \quad (7.3)$$

Розв'язання рівняння (7.3) буде не класичним, а узагальненим розв'язком диференціального рівняння (7.1). Його можна побудувати, послідовно розглядаючи такі інтервали:

- 1) $(-\infty < x < x_0 - \varepsilon)$;
- 2) $(x_0 - \varepsilon < x < x_0 + \varepsilon)$;
- 3) $(x_0 + \varepsilon < x < \infty)$.

На інтервалах 1; 3 диференціальне рівняння (7.3) однорідне, оскільки носієм дельта-функції Дірака є точка x_0 . У даних випадках рівняння (7.3) зведемо до такого вигляду:

$$\mu \frac{d^2 \varphi}{dx^2} - u \frac{d\varphi}{dx} - \sigma \varphi = 0. \quad (7.4)$$

Розглянемо інтервал $(-\infty < x < x_0 - \varepsilon)$. Шукатимемо розв'язок у вигляді $\varphi = e^{kx}$. Запишемо відповідне характеристичне рівняння:

$$\mu k^2 - uk - \sigma = 0. \quad (7.5)$$

Корені цього рівняння знайдемо із співвідношень

$$k_1 = \frac{u - \sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}}{2\mu} < 0; \quad k_2 = \frac{u + \sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}}{2\mu} > 0. \quad (7.6)$$

Відповідно до знайдених коренів розв'язок рівняння (7.4) набуде вигляду

$$\begin{aligned} \varphi &= C_1 e^{k_1 x} + C_2 e^{k_2 x} = C_1 e^{k_1(x-x_0)} e^{k_1 x_0} + C_2 e^{k_2(x-x_0)} e^{k_2 x_0} = \\ &= A e^{k_1(x-x_0)} + B e^{k_2(x-x_0)}, \end{aligned} \quad (7.7)$$

де $A = C_1 e^{k_1 x_0}$, $B = C_2 e^{k_2 x_0}$, k_1 і k_2 визначаємо за формулами (7.6).

Аналогічно знаходимо розв'язок рівняння (7.4) на інтервалі $(x_0 + \varepsilon < x < \infty)$:

$$\begin{aligned} \varphi &= C_3 e^{k_1 x} + C_4 e^{k_2 x} = C_3 e^{k_1(x-x_0)} e^{k_1 x_0} + C_4 e^{k_2(x-x_0)} e^{k_2 x_0} = \\ &= C e^{k_1(x-x_0)} + D e^{k_2(x-x_0)} \end{aligned} \quad (7.8)$$

де $C = C_3 e^{k_1 x_0}$, $D = C_4 e^{k_2 x_0}$.

З рештою розв'язок однорідних диференціальних рівнянь на інтервалах 1; 3 запишемо так:

$$\varphi = \begin{cases} A e^{k_1(x-x_0)} + B e^{k_2(x-x_0)}, & x - x_0 < 0 - \varepsilon, \\ C e^{k_1(x-x_0)} + D e^{k_2(x-x_0)}, & x - x_0 > 0 + \varepsilon. \end{cases} \quad (7.9)$$

1. Застосуємо межову умову $\varphi|_{x \rightarrow -\infty} = 0$ для знаходження констант:

$$\left(A e^{k_1(x-x_0)} + B e^{k_2(x-x_0)} \right) \Big|_{x \rightarrow -\infty} \rightarrow 0.$$

Оскільки $k_1 < 0$, $k_2 > 0$ за будь-якого u , то з межевої умови $A = 0$.

2. Аналогічним чином скористаємося межевою умовою $\varphi|_{x \rightarrow +\infty} = 0$, дійшовши висновку, що константа D повинна мати нульове значення для виконання умови

$$Ce^{k_1(x-x_0)} + De^{k_2(x-x_0)} \Big|_{x \rightarrow +\infty} \rightarrow 0. \quad (7.10)$$

З урахуванням знайдених значень коефіцієнтів A , D отримаємо розв'язок у вигляді

$$\varphi = \begin{cases} Be^{k_2(x-x_0)}, & x - x_0 < 0 - \varepsilon, \\ Ce^{k_1(x-x_0)}, & x - x_0 > 0 + \varepsilon. \end{cases} \quad (7.11)$$

З умови неперервності розв'язання в точці x_0 (за $\varepsilon \rightarrow 0$) отримаємо рівність

$$\varphi|_{x \rightarrow x_0 - 0} = \varphi|_{x \rightarrow x_0 + 0}, \quad (7.12)$$

яка буде виконуватися, якщо покласти $B = C$.

За умови дотримання зазначених умов розв'язок задачі набуде такого вигляду (за $\varepsilon \rightarrow 0$):

$$\varphi = C \begin{cases} e^{k_2(x-x_0)}, & x - x_0 < 0, \\ e^{k_1(x-x_0)}, & x - x_0 > 0; \end{cases} \quad (7.13)$$

де $k_1 < 0$, $k_2 > 0$ – власні значення характеристичного рівняння (7.5).

На інтервалі $(x_0 - \varepsilon < x < x_0 + \varepsilon)$ має місце особливість у вигляді дельта-функції Дірака. Проінтегруємо обидві частини рівняння (7.3) на зазначеному інтервалі:

$$\int_{x_0 - \varepsilon}^{x_0 + \varepsilon} \left(u \frac{d\varphi}{dx} + \sigma\varphi - \mu \frac{d^2\varphi}{dx^2} \right) dx = \int_{x_0 - \varepsilon}^{x_0 + \varepsilon} Q\delta(x - x_0) dx. \quad (7.14)$$

Ця рівність має виконуватися за будь-якого значення ε , у тому числі і за $\varepsilon \rightarrow 0$. Скористаємося властивістю дельта-функції Дірака:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\delta(x - x_0) dx = f(x_0), \quad (7.15)$$

яка виконується для будь-якої неперервної функції $f(x)$. (Ця властивість для окремого випадку, коли $f(x) \equiv 1$, згадана вище.)

Скориставшись умовою неперервності для знаходження розв'язку $\varphi(x)$ і здійснивши межовий перехід $\varepsilon \rightarrow 0$, з виразу (7.14) отримаємо рівність $Q = \mu(k_2 - k_1)C$.

Остаточний вигляд аналітичного розв'язку рівняння (7.3), що відповідає вибраним умовам, буде таким:

$$\varphi = \frac{Q}{\mu(k_2 - k_1)} \begin{cases} e^{k_2(x-x_0)}, & x - x_0 < 0; \\ e^{k_1(x-x_0)}, & x - x_0 > 0. \end{cases} \quad (7.16)$$

7.4. Рекомендації і вимоги до виконання завдання

Для побудови графіків залежностей (див. п. 7.2) завдання та їх параметричного дослідження рекомендуємо за базовий варіант значень даних взяти значення, наведені в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Вихідні дані для базового варіанта розрахунків

Варіант	u	μ	σ	x_0	Q	d_L	d_R
Розмірність	м/с	м ² /с	1/с	м	(кг/г)/м ²	м	м
1	4	10	0,7	500	3,6	8	10
2	3	7	0,35	200	18,0	8	6
3	1	2,5	0,4	400	2,9	6	6
4	2	4	0,6	-300	1,8	4	5
5	1,5	3	0,4	250	2,2	5	5
6	2,5	2	0,7	450	7,2	4	4
7	3,5	5	0,45	-100	9,0	4	6

Інтервал (a, b) для спостереження зміни концентрації вздовж осі Ox вибрати як $(x_0 - d_L, x_0 + d_R)$, де x_0 – місце розміщення точкового джерела викиду забруднювальної речовини; d_L, d_R – ліва та права межі відносно джерела викиду.

Для параметричного дослідження впливу вихідних параметрів на розподіл забруднення рекомендуємо:

1. На кожній діаграмі побудувати три графіки залежності $\varphi(x)$ для трьох різних значень одного з параметрів (наприклад, швидкості вітру u) за умови фіксованих значень двох інших параметрів (варійовані параметри виділено в таблиці жирним).

2. Один із цих графіків має відповідати базовому варіанту, обраному з таблиці, два інших варіанти – відображати вплив змінних параметрів (наприклад, швидкості вітру u) на розподіл концентрації.

Таблиця 7.2

Вихідні дані для прикладу розрахунків

Вихідні дані		Величина
U , м/с	1,5	Швидкість
μ , м ² /с	3	Коефіцієнт турбулентної дифузії атмосфери
σ , л/с	0,4	Коефіцієнт нейтралізації
x_0 , м	250	Координата точкового джерела
Q , кг/с	2,2	Потужність точкового джерела
d_L , м	6	Ліва межа відносно джерела викиду
d_R , м	6	Права межа відносно джерела викиду
a , м	244	Початок досліджуваної ділянки
b , м	256	Кінець досліджуваної ділянки
n	30	Кількість кроків по осі Ox
dx , м	0,4	Крок по осі Ox

3. Потрібні значення варіацій для величин підібрати самостійно таким чином, щоб вплив відповідного параметра був наочним.

Приклади графіків, що наочно демонструють поширення забруднення за різних значень параметрів стану атмосферного повітря, зображено на рис. 7.1–7.3 вихідні дані для прикладу розрахунків наведено в табл. 7.2.

7.5 Приклади розподілу концентрації залежно від стану параметрів атмосфери

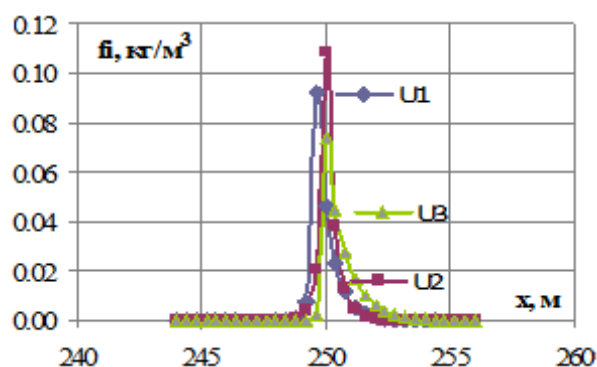


Рисунок 7.1 Розподіл концентрації забруднення за різних значень швидкості вітру: $U_1=1,5$ м/с; $U_2=0,5$ м/с; $U_3=2,5$ м/с

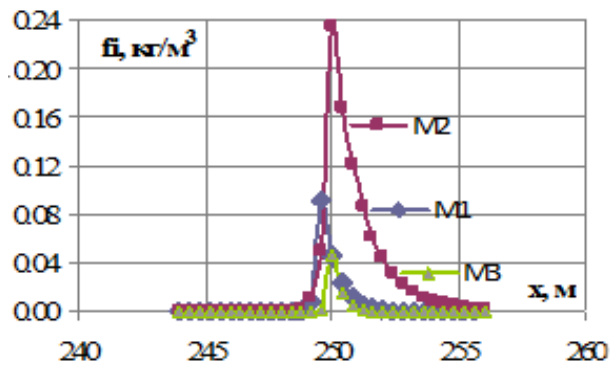


Рисунок 7.2 Розподіл концентрації забруднення за різних значень коефіцієнта дифузії: $\mu_1=3 \text{ м}^2/\text{с}$; $\mu_2=2 \text{ м}^2/\text{с}$; $\mu_3=4 \text{ м}^2/\text{с}$

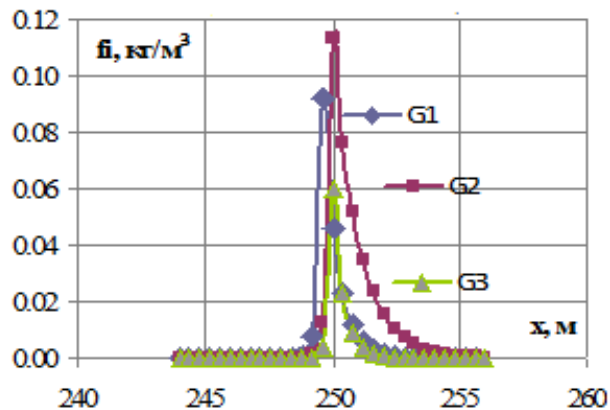


Рисунок 7.3 Розподіл концентрації забруднення за різних значень коефіцієнта нейтралізації: $\sigma_1=0,4 \text{ 1/с}$; $\sigma_2=0,2 \text{ 1/с}$; $\sigma_3=0,6 \text{ 1/с}$

7.6 Питання і завдання для самоконтролю

1. Яким нестационарним рівнянням перенесення, у загальному випадку описують поширення забруднення від точкового джерела в атмосфері?
2. Якими властивостями дельта-функції Дірака достатньо скористатися в межах даної роботи?
3. Яким умовам відповідають математичні спрощення нестационарного рівняння перенесення?
4. Як коротко сформулювати визначення коефіцієнта нейтралізації, коефіцієнта дифузії, інтенсивності точкового джерела.
5. В якому випадку одновимірне наближення впливає із загальної просторової задачі поширення забруднення в атмосфері?
6. Які можна зробити висновки про поширення забруднення за напрямом вітру і проти нього?
7. Які можна зробити висновки про вплив швидкості вітру, коефіцієнтів дифузії і нейтралізації на розподіл забруднення?

8. Одержати аналітичний розв'язок задачі про стаціонарний розподіл концентрації φ , [кг/м³], аерозолі в атмосфері від дії плоского джерела з постійною поверхневою потужністю $q=3 \cdot j$ [кг/(м²·с)] у разі швидкості вітру $u=j$ [м/с], постійного значення коефіцієнта турбулентної дифузії $\mu=0,1 \cdot j$ [м²/с] і постійного значення коефіцієнта нейтралізації $\sigma=6 \cdot j$ [с⁻¹], j – номер студента в журналі групи.

9. Записати рівняння для концентрації $\varphi(x,t)$ аерозольного забруднення, яке б враховувало:

- дифузію з коефіцієнтом 0,25 м²/с;
- перенос забруднення вітром зі швидкістю 2 м/с;
- нейтралізацію з коефіцієнтом 0,1 с⁻¹.

Виконати перетворення записаного рівняння до рівняння, яке б враховувало тільки дифузію.

8. ПРАКТИЧНА РОБОТА 2

Дослідження особливостей поширення забруднення від постійно діючих точкових джерел в одновимірному наближенні

Суть роботи: дослідження впливу параметрів стану атмосферного повітря на розподіл концентрації забруднення за постійно діючих точкових джерел.

8.1 Постановка завдання

У загальному випадку поширення забруднення в атмосфері описуються нестационарним рівнянням перенесення:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial(u\varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(v\varphi)}{\partial y} + \frac{\partial(w\varphi)}{\partial z} + \sigma\varphi = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \sum_{i=1}^n Q_i \delta(x - x_{0i}, y - y_{0i}, z - z_{0i}, t). \quad (8.1)$$

У цьому рівнянні φ – інтенсивність забруднення, [кг/м³]; x, y, z – координати точки спостереження, [м]; t – час, [с]; u, v, w – компоненти вектору швидкості вітру, [м/с]; σ – коефіцієнт нейтралізації забруднення, [1/с]; μ – коефіцієнти турбулентної дифузії атмосфери, [м²/с]; Q_i – потужність i -го

точкового джерела забруднень, [кг/с]; x_{0i}, y_{0i}, z_{0i} – координати точкових джерел; $\delta(x - x_{0i}, y - y_{0i}, z - z_{0i}, t)$ – дельта функція Дірака.

Зауваження 1. Якщо знехтувати математичною строгістю у визначенні дельта-функції Дірака $\delta(x - x_{0i}, y - y_{0i}, z - z_{0i})$, то в межах даної роботи достатньо скористатися такими її властивостями:

1) значення цієї функції дорівнюють нулю в усіх точках простору, крім точок (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}) ;

2) у зазначених точках дана функція набуває нескінченно великого значення;

3) інтеграл $\int \delta(x - x_{0i}, y - y_{0i}, z - z_{0i}) dx dy dz$ по всьому простору дорівнює одиниці.

У даній роботі розглядатимемо значне спрощення математичної моделі, яке дозволяє отримати прості аналітичні залежності. Математичні спрощення рівняння (8.1) відповідають таких умов:

- розглянемо стаціонарний процес поширення забруднення;
- виберемо одновимірну модель такого процесу;
- візьмемо параметри переносу: швидкість вітру, коефіцієнти дифузії і нейтралізації незмінними величинами.

У такому спрощенні рівняння (2.1) для концентрації забруднення φ набуде вигляду:

$$u \frac{d\varphi}{dx} + \sigma \varphi = \mu \frac{d^2 \varphi}{dx^2} + \sum_{i=1}^n Q_i \delta(x - x_{0i}), \quad (8.2)$$

де u – швидкість вітру, збігається за напрямом з віссю Ox , [м/с]; σ – коефіцієнт нейтралізації, [1/с]; μ – коефіцієнт дифузії, [м²/с]; Q_i – інтенсивність i -го точкового джерела, [кг/с]; $\delta(x - x_{0i})$ – дельта-функція Дірака.

Рівняння (8.1) розглядатимемо на всій осі Ox за умови, що у разі $\sigma \neq 0$ концентрація забруднення на нескінченності, тобто за $x \rightarrow \pm\infty$, наближається до нуля.

Зауваження 2. Необхідно усвідомити, в якому випадку одновимірне наближення виходить із загальної просторової задачі (8.1). Уявімо собі, що в просторі існує площина, кожен квадратний метр якої створює за кожну секунду Q_i кг домішок, (Q_i , [кг/(с*м²)], $Q_i = \text{const}$). Така площина («створюваний фронт»)

розміщена перпендикулярно координатній осі Ox в точці $x=x_{0i}$. Відтак перенесення забруднень, вироблених вказаною площиною, відбуватиметься тільки вздовж осі Ox (вздовж повітряного потоку). У такому випадку не існує факторів, які б змінили концентрацію забруднень в напрямках, перпендикулярних осі Ox . Тому можна припустити, що функції φ та δ залежать тільки від координати x .

У такому наближенні δ -функцію можна зобразити рівністю $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x - x_{0i}) dx = 1$. Розв'язок

8.2 Завдання до практичної роботи

1. Побудувати неперервне аналітичне розв'язання рівняння (8.2) з урахуванням необхідної поведінки розв'язання на нескінченності за наявності трьох джерел забруднення.

2. Розрахувати розподіл концентрації забруднення на заданій ділянці (a, b) за різних значень потужності джерел забруднення, розташованих в точках $x_{0i} \in (a, b)$, і заданих значеннях параметрів атмосфери: швидкості вітру, коефіцієнта дифузії, коефіцієнта нейтралізації.

3. Розрахувати розподіл концентрації забруднення на заданій ділянці (a, b) для різних значень швидкості вітру у випадку розташування джерел забруднення в точці $x_{0i} \in (a, b)$ за незмінних значень параметрів атмосфери: коефіцієнта дифузії та коефіцієнта нейтралізації.

4. Розрахувати розподіл концентрації забруднення на заданій ділянці (a, b) для різних значень коефіцієнта дифузії у разі розташування джерел забруднення в точці $x_{0i} \in (a, b)$ за незмінних значень параметрів атмосфери: швидкості вітру та коефіцієнта нейтралізації.

5. Розрахувати розподіл концентрації забруднення на заданій ділянці (a, b) для різних значень коефіцієнта нейтралізації у випадку розташування джерел забруднення в точці $x_{0i} \in (a, b)$ за незмінних значень параметрів атмосфери: швидкості вітру та коефіцієнта дифузії.

6. Побудувати графік залежності $\varphi(x)$ і проаналізувати поширення забруднення за напрямом вітру і проти нього.

7. Проаналізувати вплив швидкості вітру, коефіцієнтів дифузії і нейтралізації на розподіл забруднення, коментуючи побудовані графіки.

8.3 Аналітичне розв'язання

Рівняння для розподілу концентрації забруднення від декількох джерел має вигляд

$$u \frac{d\varphi}{dx} + \sigma\varphi = \mu \frac{d^2\varphi}{dx^2} + \sum_{i=1}^n Q_i \delta(x - x_{0i}), \quad (8.3)$$

де в правій частині записана кількість джерел забруднення $i = 1, 2, \dots, n$ різної потужності Q_i , розміщених у точках x_{0i} .

Для лінійного рівняння (8.3) можна скористатися умовою адитивності. Аналітичний розв'язок рівняння для розподілу концентрації забруднення від одного точкового джерела набуде вигляду:

$$\varphi = \frac{Q_i}{\mu(k_2 - k_1)} \begin{cases} e^{k_2(x-x_{0i})}, & x - x_{0i} < 0; \\ e^{k_1(x-x_{0i})}, & x - x_{0i} > 0. \end{cases} \quad (8.4)$$

$i = 1, 2, \dots, n.$

Після знаходження розв'язку для кожного точкового джерела визначимо загальний розв'язок, скориставшись принципом суперпозиції:

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n \varphi_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (8.5)$$

за граничних умов

$$\varphi|_{x \rightarrow \pm\infty} = 0. \quad (8.6)$$

8.4 Рекомендації і вимоги до виконання завдання

Розрахувати розподіл концентрації забруднення (див. п. 8.2), побудувати графіки та виконати їх параметричне дослідження, за варіант вихідних даних взяти значення, наведені в табл. 8.1.

Інтервал (a, b) для спостереження зміни концентрації вздовж осі Ox вибрати як $(x_{02} - d_L, x_{02} + d_R)$, де x_{02} – місце знаходження другого точкового джерела викиду забруднювальної речовини; d_L, d_R – ліва та права межі відносно другого джерела викиду.

Для параметричного дослідження впливу вихідних параметрів задачі на розподіл забруднення (див. п. 8.2 завдання) рекомендуємо:

1) побудувати розподіл концентрації $\varphi_i(x)$ для трьох джерел забруднення, що існують окремо, а потім, застосовуючи принцип суперпозиції, знайти

сумарний розподіл концентрації забруднення $\varphi(x)$. Розрахунки провести за заданими (табл. 8.1) значеннями параметрів стану атмосферного повітря;

2) побудувати три графіка залежності $\varphi(x)$ для трьох різних значень одного з параметрів (наприклад, швидкості вітру u) за фіксованих значень двох інших параметрів (варіативні параметри виділені в таблиці жирним);

3) один із трьох означених вище графіків має відповідати базовому варіанту, обраному з таблиці, два інших варіанти – показувати вплив змінних параметрів (наприклад, швидкості вітру u або коефіцієнта дифузії μ , або коефіцієнта нейтралізації σ) на розподіл концентрації;

3) підібрати самостійно потрібні значення варіацій для величин таким чином, щоб вплив відповідного параметра був наочним.

Таблиця 8.1

Значення вихідних даних для базового варіанта розрахунків

Варіант	u	μ	σ	x_{0i}	Q	d_L	d_R
Розмірність	м/с	м ² /с	1/с	м	кг/с	м	м
1	5	8	0,8	498, 500, 502	4,8	10	12
2	4	6	0,45	198, 200, 202	12,0	10	8
3	2	3,5	0,5	398, 400, 402	4,8	8	8
4	3	5	0,7	-302, -300, -298	2,8	6	7
5	2,5	4	0,6	248, 250, 252	3,2	7	7
6	3,5	2	0,65	448, 450, 452	6,2	6	6
7	4,5	3	0,55	-102, -100, -98	8,0	6	8

На рисунках 8.1–8.7 розміщено приклади графіків, що наочно демонструють поширення забруднення за різних значень параметрів стану атмосферного повітря (табл. 2.2).

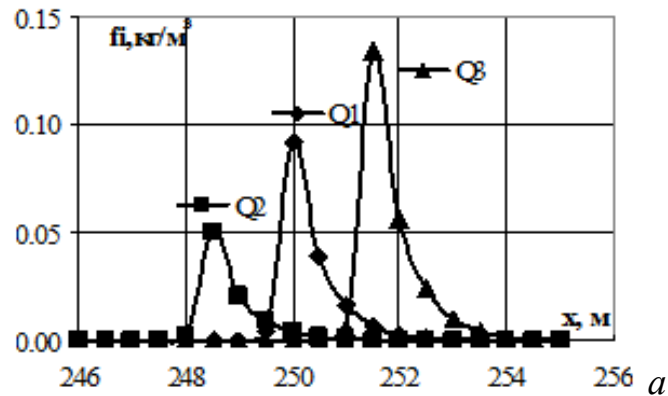
Таблиця 8.2

Значення вихідних даних для прикладу розрахунків

Вихідні дані		Показник
U , м/с	1,5	Швидкість
μ , м ² /с	3	Коефіцієнт турбулентної дифузії атмосфери
σ , 1/с	0,4	Коефіцієнт нейтралізації
x_0 , м	248,5; 250; 251,5	Координати точкових джерел
Q , кг/с	2,2	Потужність точкових джерел
d_L , м	11	Ліва межа відносно джерела викиду
d_R , м	10	Права межа відносно джерела викиду

Вихідні дані		Показник
a , м	240	Початок досліджуваної ділянки
b , м	255	Кінець досліджуваної ділянки
n	30	Кількість кроків по осі Ox
dx , м	0,5	Крок по осі Ox

8.5 Приклади розподілу концентрації залежно від стану параметрів атмосфери



$$Q_1=2,2 \text{ кг/с}; Q_2=1,2 \text{ кг/с}; Q_3=3,2 \text{ кг/с}$$

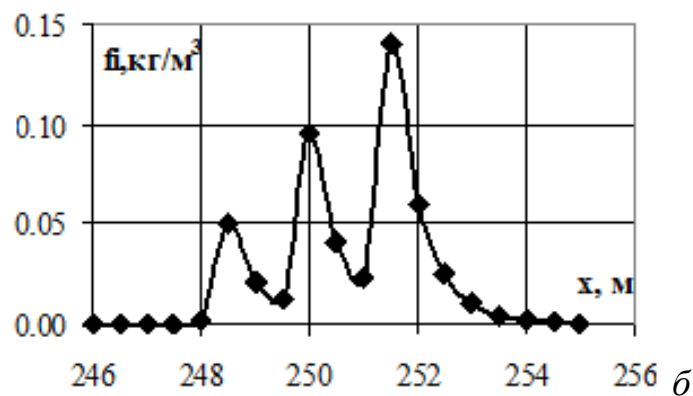


Рисунок 8.1 Розподіл концентрації забруднення:
 a – для кожного джерела окремо; $б$ – сумарний розподіл

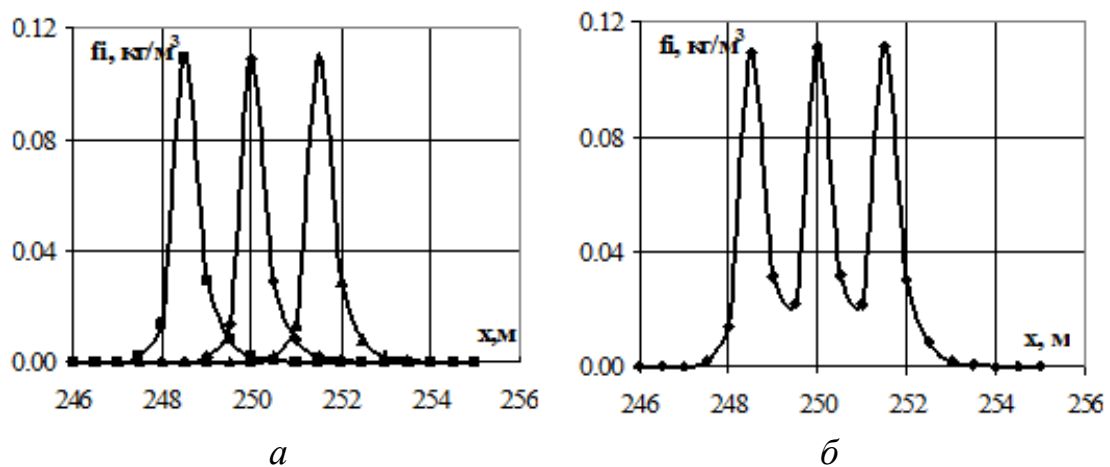


Рисунок 8.2 Розподіл концентрації забруднення за $U=0,5$ м/с:
 a – для кожного джерела окремо; $б$ – сумарний розподіл

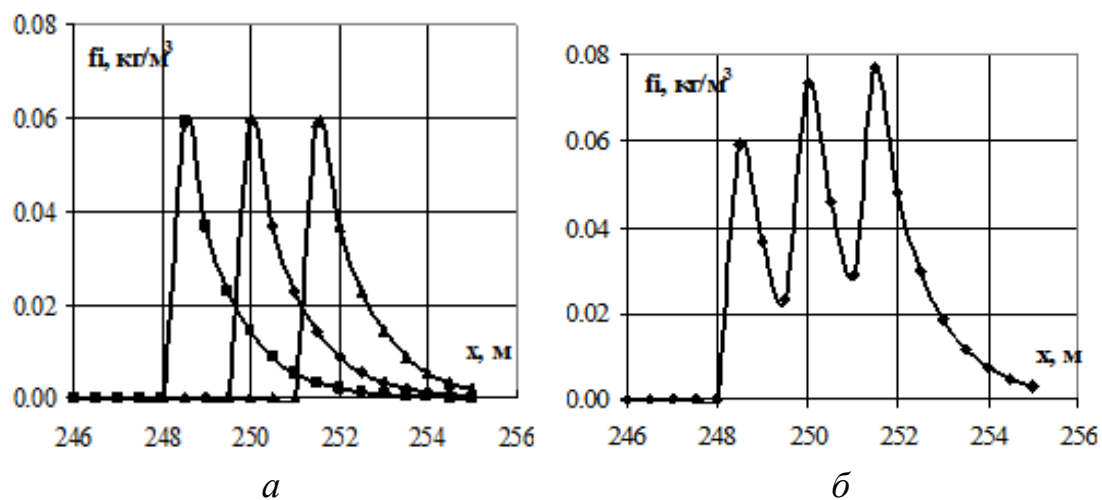


Рисунок 8.3 Розподіл концентрації забруднення за $U=3,5$ м/с:
 a – для кожного джерела окремо; $б$ – сумарний розподіл

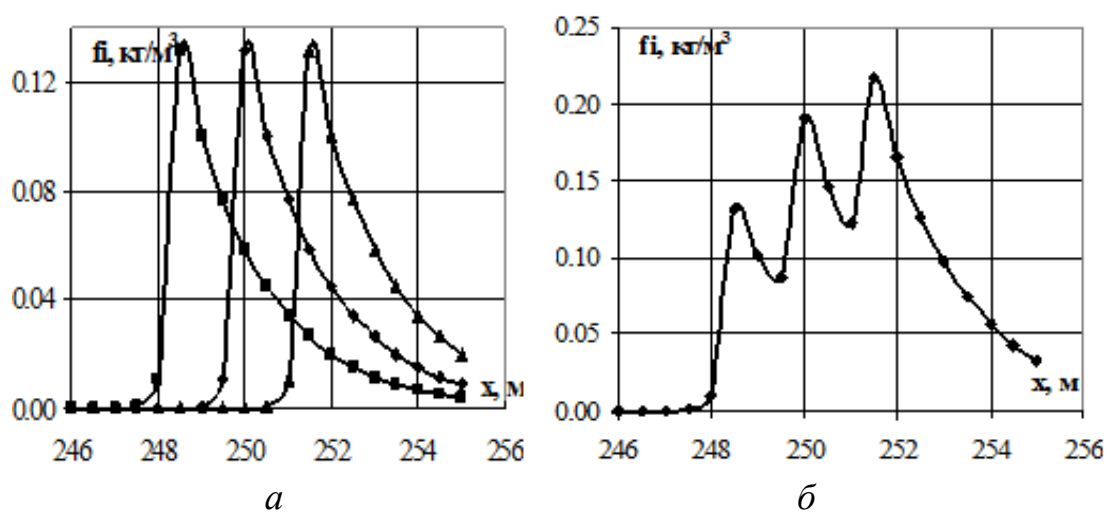


Рисунок 8.4. Розподіл концентрації забруднення за $\sigma=0,1$ 1/с:
 a – для кожного джерела окремо; $б$ – сумарний розподіл

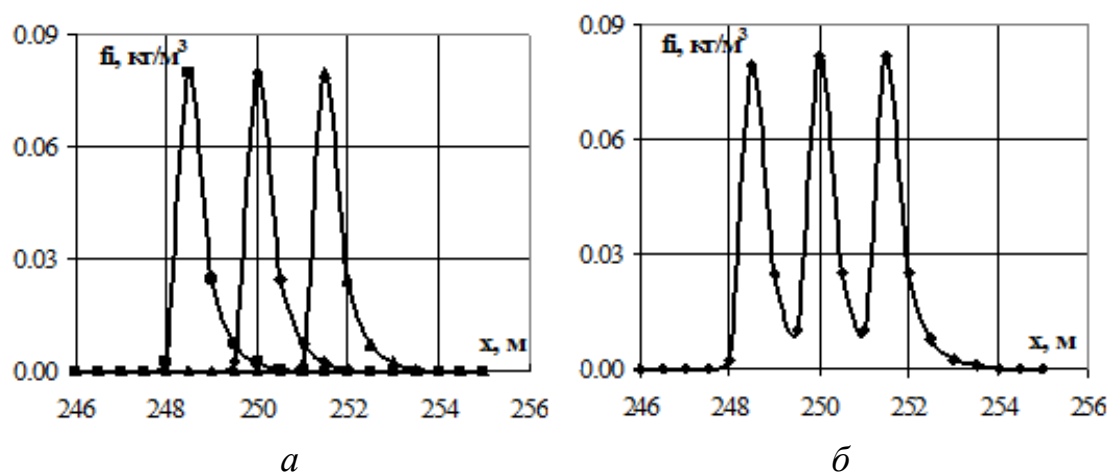


Рисунок 8.5 Розподіл концентрації забруднення за $\sigma=0,6$ 1/с:
 a – для кожного джерела окремо; $б$ – сумарний розподіл

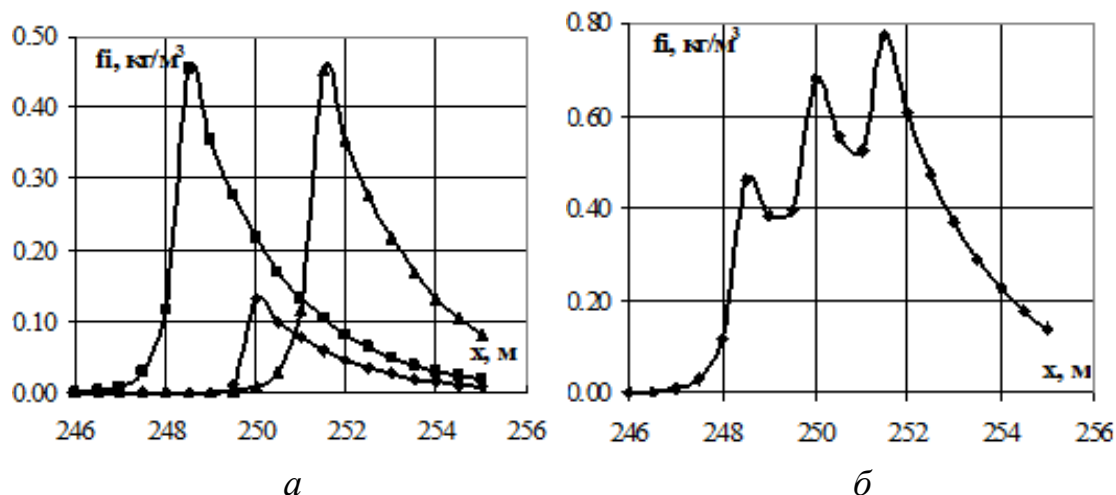


Рисунок 8.6 Розподіл концентрації забруднення за $\mu=1,5 \text{ м}^2/\text{с}$:
 a – для кожного джерела окремо; $б$ – сумарний розподіл

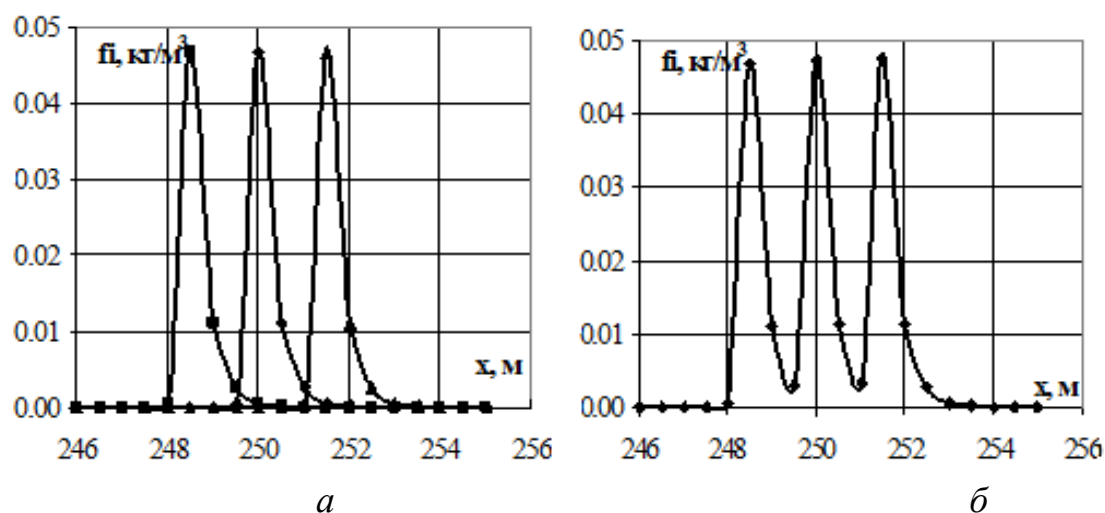


Рисунок 8.7 Розподіл концентрації забруднення за $\mu=4,0 \text{ м}^2/\text{с}$:
 a – для кожного джерела окремо; $б$ – сумарний розподіл

8.6 Питання і завдання для самоконтролю

1. Яким нестационарним рівнянням перенесення, у загальному випадку описують поширення забруднення в атмосфері від декількох точкових джерел?
2. Як знайти сумарний розподіл концентрації забруднення $\varphi(x)$ від декількох точкових джерел? Яким принципом користуються?
3. Як впливають на розподіл концентрації забруднення різні значення потужності джерел забруднення, що розташовані в точках $x_{0i} \in (a, b)$ за заданих значень параметрів атмосфери.
4. Як впливають на розподіл концентрації забруднення різні значення швидкості вітру у випадку розташування джерел забруднення в точках

$x_{0i} \in (a, b)$ за незмінних значень параметрів атмосфери: коефіцієнта дифузії та коефіцієнта нейтралізації.

5. Як впливають на розподіл концентрації забруднення різні значення коефіцієнта дифузії у випадку розташування джерел забруднення в точках $x_{0i} \in (a, b)$ за незмінних значень параметрів атмосфери: швидкості вітру та коефіцієнта нейтралізації.

6. Як впливають на розподіл концентрації забруднення різні значення коефіцієнта нейтралізації у випадку розташування джерел забруднення в точках $x_{0i} \in (a, b)$ за незмінних значень параметрів атмосфери: швидкості вітру та коефіцієнта дифузії.

7. Які висновки можна зробити про поширення забруднення за напрямом вітру і проти нього?

8. Розв'язати рівняння стаціонарного розподілу забруднення:

$$u \frac{d\varphi}{dx} + \sigma\varphi = \mu \frac{d^2\varphi}{dx^2} + 2\delta(x+2) + 3\delta(x) + \delta(x-3)$$

для значень: $u = 2$ м/с, $\sigma = 0,1$ 1/с, $\mu = 0,15$ м²/с.

9. Одержати аналітичний розв'язок задачі про стаціонарний розподіл концентрації φ , [кг/м³]. Чисте повітря рухається зі швидкістю $u=j$ [м/с]. В пункті А виникає два викиди аміаку з інтервалом 1 год. Перший викид містить $0,1 \cdot j$ [т] аміаку, а другий – $0,2 \cdot j$ [т] аміаку. Визначити концентрацію забруднення повітря [т/м³] через 1 годину після другого викиду на відстані $2 \cdot j$ [км] від пункту А за напрямом вітру, якщо коефіцієнт турбулентної дифузії $\mu=0,1 \cdot j$ [км²/год], а коефіцієнт нейтралізації дорівнює нулю, j – номер студента в журналі групи.

9. ПРАКТИЧНА РОБОТА 3

Дослідження особливостей поширення забруднення від постійно діючого розподіленого джерела в одновимірному наближенні

Суть роботи: дослідження впливу параметрів стану атмосферного повітря на розподіл концентрації забруднення за постійно діючого розподіленого джерела

9.1 Постановка завдання

Модельне рівняння одновимірною стаціонарною перенесення забруднення має вигляд

$$u \frac{d\varphi}{dx} + \sigma\varphi = \mu \frac{d^2\varphi}{dx^2} + f(x), \quad (9.1)$$

де $f(x)$ – щільність потужності джерел забруднення.

В практичній роботі 1 розглянуто частковий випадок, який враховував розміщення точкового джерела в точці $x = x_0$, а саме:

$$f(x) = Q\delta(x - x_0). \quad (9.2)$$

У випадку подальшого узагальнення аналітичний розв’язок задачі (9.1) – (9.2) зведемо до такого вигляду:

$$\varphi(x) = QG(x - x_0), \quad (9.3)$$

де

$$G(\xi) = \frac{1}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} \begin{cases} e^{k_2\xi}, & \text{за } \xi > 0; \\ e^{k_1\xi}, & \text{за } \xi < 0. \end{cases} \quad (9.4)$$

Величини k_1, k_2 (див. п. 9.3) знайдемо із співвідношень

$$k_1 = \frac{u - \sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}}{2\mu}; \quad k_2 = \frac{u + \sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}}{2\mu}. \quad (9.5)$$

Скориставшись головною властивістю δ -функції, отримаємо

$$\begin{cases} \int_a^b \delta(x - x_0)g(x_0)dx_0 = g(x), & \text{якщо } x \in [a, b]; \\ \int_a^b \delta(x - x_0)g(x_0)dx_0 = 0, & \text{якщо } x \notin [a, b]. \end{cases} \quad (9.6)$$

Рівності (9.6) справедливі у випадку довільної функції $g(x)$, яку можна проінтегрувати на проміжку $[a, b]$. Якщо інтервал $[a, b]$ представляє собою всю числову вісь, як у разі задачі розповсюдження домішки в безмежному просторі, то функцію $f(x)$ можна записати

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - x_0) f(x_0) dx_0. \quad (9.7)$$

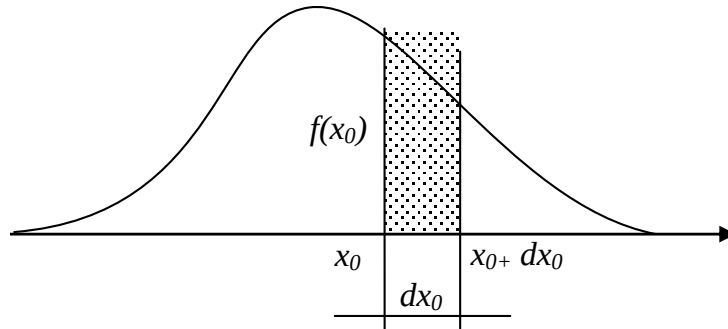


Рисунок 9.1 Неперервний розподіл джерела забруднення

Припустимо, що джерела забруднення розподілені неперервно вздовж ділянки $[a, b]$ з лінійною потужністю $f(x)$ [кг/с/м] (рис. 9.1). На малому частинному проміжку dx дію джерел замінимо дією точкового джерела, що знаходиться в точці x_0 та має потужність

$$dQ \approx f(x_0) dx_0. \quad (9.8)$$

Скористаємося тим, що визначений інтеграл є межею інтегральних доданків у разі нескінченного розбиття відрізка $[a, b]$ на частинні інтервали

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - x_0) f(x_0) dx_0 &\approx \sum_k \delta(x - x_{0k}) f(x_{0k}) dx_{0k} = \\ &= \sum_k \delta(x - x_{0k}) dQ_k. \end{aligned} \quad (9.9)$$

Функція $f(x)$ в правій частині рівняння (9.1) набуде вигляду:

$$\sum_k \delta(x - x_{0k}) dQ_k. \quad (9.10)$$

Зрештою дія розподілених джерел зводиться до дії сукупності точкових джерел (в силу лінійності рівняння та принципу суперпозиції його розв'язку). Ці джерела розміщуються в точках x_{0k} осі Ox та мають потужність dQ_k [кг/с]. Розв'язок рівняння (9.1) з правою частиною виду (9.10) зведемо до такого вигляду:

$$\varphi(x) = \sum_k dQ_k G(x - x_{0k}). \quad (9.11)$$

Скориставшись у виразі (9.11) умовою допустимості межового переходу, розв'язок рівняння (9.1) з неперервним розподілом джерел набуде вигляду:

$$\varphi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x-x_0) f(x_0) dx_0. \quad (9.12)$$

9.2 Завдання до практичної роботи

1. Знайти неперервне аналітичне розв'язання рівняння (9.1) у випадку розподіленого неперервного джерела заданої потужності:

$$Q = \begin{cases} 1, & \text{за } x \in [x_1, x_2]; \\ 0, & \text{за } x \notin [x_1, x_2]. \end{cases} \quad (9.13)$$

2. Розрахувати розподіл концентрації забруднення на заданій ділянці $[a, b]$ для різних значень потужності джерел забруднення на ділянці (x_1, x_2) за незмінних значень параметрів атмосфери: швидкості вітру, коефіцієнта дифузії, коефіцієнта нейтралізації.

3. Розрахувати розподіл концентрації забруднення на заданій ділянці $[a, b]$ для різних значень швидкості вітру за незмінних значень параметрів атмосфери: коефіцієнта дифузії та коефіцієнта нейтралізації.

4. Розрахувати розподіл концентрації забруднення на заданій ділянці $[a, b]$ для різних значень коефіцієнта дифузії за незмінних значень параметрів атмосфери: швидкості вітру та коефіцієнта нейтралізації.

5. Розрахувати розподіл концентрації забруднення на заданій ділянці $[a, b]$ для різних значень коефіцієнта нейтралізації за незмінних значень параметрів атмосфери: швидкості вітру та коефіцієнта дифузії.

6. Побудувати графік залежності $\varphi(x)$ і проаналізувати поширення забруднення за напрямом вітру і проти нього.

7. Проаналізувати вплив швидкості вітру, коефіцієнтів дифузії і нейтралізації на розподіл забруднення, коментуючи побудовані графіки.

9.3 Аналітичне розв'язання

Одновимірне стаціонарне рівняння перенесення забруднення має вигляд

$$u \frac{d\varphi}{dx} + \sigma\varphi = \mu \frac{d^2\varphi}{dx^2} + f(x), \quad (9.14)$$

де $f(x)$ – щільність потужності джерел, що задається залежністю (9.13). Його розв’язання шукатимемо на трьох проміжках.

1. У випадку, коли $x < x_1$ і $x_0 \in [x_1, x_2]$, виходить, що $x < x_0$. Введемо змінну ξ , що набуде вигляду $\xi = x - x_0 < 0$. Скористаємося рішенням (7.16), що отримане в практичній роботі 1 для точкового джерела, а саме:

$$\varphi(x) = \frac{Q}{\mu(k_2 - k_1)} \begin{cases} e^{k_2(x-x_0)}, & x - x_0 < 0; \\ e^{k_1(x-x_0)}, & x - x_0 > 0. \end{cases}$$

Власні значення $k_1 < 0$, $k_2 > 0$ характеристичного рівняння (7.5) визначаються за співвідношеннями (7.6). Підставляючи замість k_1 та k_2 їх аналітичні вирази, отримаємо:

$$G(x) = \frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} e^{k_2(x-x_0)}. \quad (9.15)$$

Значення концентрації на даному проміжку набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x) &= \frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} \int_{x_1}^{x_2} e^{k_2(x-x_0)} dx_0 = -\frac{1}{k_2} \frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} e^{k_2(x-x_0)} \Big|_{x_0=x_1}^{x_0=x_2} = \\ &= -\frac{1}{k_2} \frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} [e^{k_2(x-x_2)} - e^{k_2(x-x_1)}]. \end{aligned} \quad (9.16)$$

2. У випадку, коли $x > x_2$ і $x_0 \in [x_1, x_2]$, виходить, що $x > x_0$, тоді $\xi = x - x_0 > 0$. Аналогічно принципу розв’язання на першому проміжку, отримаємо:

$$G(x) = \frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} e^{k_1(x-x_0)}. \quad (9.17)$$

Значення концентрації на такому проміжку буде обчислюватися так:

$$\begin{aligned} \varphi_2(x) &= \frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} \int_{x_1}^{x_2} e^{k_1(x-x_0)} dx_0 = -\frac{1}{k_1} \frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} e^{k_1(x-x_0)} \Big|_{x_0=x_1}^{x_0=x_2} = \\ &= -\frac{1}{k_1} \frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} [e^{k_1(x-x_2)} - e^{k_1(x-x_1)}]. \end{aligned} \quad (9.18)$$

3. У випадку, коли $x_1 \leq x \leq x_2$ і $x_0 \in [x_1, x_2]$, виходить, що $x > x_0$, тоді ξ може бути, як більше нуля $\xi = x - x_0 > 0$, так і менше нуля. Аналогічно принципу розв'язання на першому та другому проміжках, отримаємо:

$$G(x) = \frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} e^{k_2(x-x_0)}, \text{ за } x - x_0 < 0 \quad (9.19)$$

$$G(x) = \frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} e^{k_1(x-x_0)}, \text{ за } x - x_0 > 0 \quad (9.20)$$

$$\begin{aligned} \varphi_3(x) &= \frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} \left[\int_{x_1}^x e^{k_1(x-x_0)} dx_0 + \int_x^{x_2} e^{k_2(x-x_0)} dx_0 \right] = \\ &= -\frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} \left[\frac{1}{k_1} e^{k_1(x-x_0)} \Big|_{x_0=x_1}^{x_0=x} + \frac{1}{k_2} e^{k_2(x-x_0)} \Big|_{x_0=x}^{x_0=x_2} \right] = \\ &= -\frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} \left[\frac{1}{k_1} e^{k_1(x-x)} - \frac{1}{k_1} e^{k_1(x-x_1)} + \frac{1}{k_2} e^{k_2(x-x_2)} - \frac{1}{k_2} e^{k_2(x-x)} \right] = \\ &= -\frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} \left[\frac{1}{k_1} (1 - e^{k_1(x-x_1)}) + \frac{1}{k_2} (e^{k_2(x-x_2)} - 1) \right]. \end{aligned}$$

Остаточний вигляд аналітичного розв'язку рівняння (7.14), що відповідає умовам $x_1 \leq x \leq x_2$ і $x_0 \in [x_1, x_2]$, буде таким:

$$\varphi_3(x) = -\frac{Q}{\sqrt{u^2 + 4\mu\sigma}} \left[\left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2} \right) - \left(\frac{e^{k_1(x-x_1)}}{k_1} - \frac{e^{k_2(x-x_2)}}{k_2} \right) \right]. \quad (9.21)$$

9.4 Рекомендації і вимоги до виконання завдання

Для побудови графіків залежностей (див. п. 9.2) завдання та їх параметричного дослідження рекомендуємо за базовий варіант вихідних даних взяти значення, наведені в табл. 9.1.

Для параметричного дослідження впливу вихідних параметрів на розподіл забруднення (див. п. 9.2 завдання) рекомендуємо:

1. Побудувати розподіл концентрації $\varphi(x)$ для неперервного розподілу джерела забруднення, що діє на проміжку з симетричними границями,

наприклад $[x_1; x_2] = [-4; 4]$, а потім на проміжку, що заданий відповідно варіанту табл. 9.1.

2. Провести розрахунки за умови заданих значень параметрів стану атмосферного повітря (табл. 9.1), змінюючи кількість розрахункових вузлів в середині проміжку (в два рази більше, в три рази більше) та поза ним.

3. Побудувати графіки залежності $\varphi(x)$ для трьох різних значень одного з параметрів (наприклад, швидкості вітру u), за умови фіксованих значень двох інших параметрів (варійовані параметри виділено в таблиці жирним).

4. Один із цих графіків має відповідати базовому варіанту, обраному з таблиці, два інших варіанти – відображати вплив змінних параметрів (наприклад, швидкості вітру u або коефіцієнта дифузії μ , або коефіцієнта нейтралізації σ) на розподіл концентрації.

5. Підібрати для досліджуваних величин потрібні значення варіацій таким чином, щоб вплив відповідного параметра був наочним.

Таблиця 9.1

Вихідні дані для базового варіанта розрахунків

Варіант	u	μ	σ	$[x_1; x_2]$	Q	a	b
Розмірність	м/с	м ² /с	1/с	м	(кг/г)/м ²	м	м
1	5	8	0,8	[-4; 5]	5,8	-12	12
2	4	6	0,45	[-6; 7]	11,0	-14	14
3	2	3,5	0,5	[-3; 4]	5,8	-10	10
4	3	5	0,7	[-2; 3]	3,8	-8	8
5	2,5	4	0,6	[-5; 6]	4,2	-10	10
6	3,5	2	0,65	[-7; 8]	7,2	-18	18
7	4,5	3	0,55	[-2,5; 3,5]	7,0	-16	16

Приклади графіків, що наочно демонструють поширення забруднення за різних значень параметрів стану атмосферного повітря, зображено на рисунках 9.3–9.5, вихідні дані для прикладу розрахунків наведено в таблиці 9.2.

Таблиця 9.2

Вихідні дані для прикладу розрахунків

Вихідні дані		Покзник
U , м/с	0; 1; 5	Швидкість
μ , м ² /с	1,0; 2,5; 8,0	Коефіцієнт турбулентної дифузії атмосфери
σ , 1/с	0,01; 0,4; 0,8;	Коефіцієнт нейтралізації
$[x_1; x_2]$, м	[-3; 3]	Координата точкового джерела
Q , кг/с	1,8; 2,9; 4,0	Потужність розподіленого джерела

Вихідні дані		Покзник
$a, \text{ м}$	-10	Початок досліджуваної ділянки
$b, \text{ м}$	24	Кінець досліджуваної ділянки
N	116	Кількість кроків по осі Ox
$dx, \text{ м}$	0,5, коли $x_0 \notin [x_1, x_2]$ 0,1, коли $x_0 \in [x_1, x_2]$	Крок по осі Ox

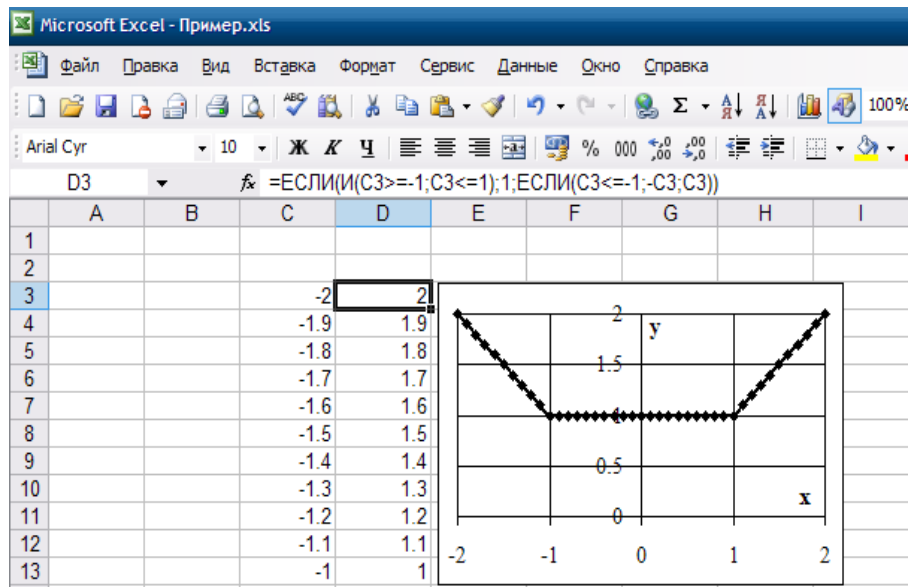


Рисунок 9.2 Приклад запису умовного оператора

Якщо обчислення виконуються в табличному редакторі Excel, то можна скористатися умовним оператором, записаним для функції, що представлена на рисунку 9.2.

9.5 Приклади розподілу концентрації залежно від стану параметрів атмосфери

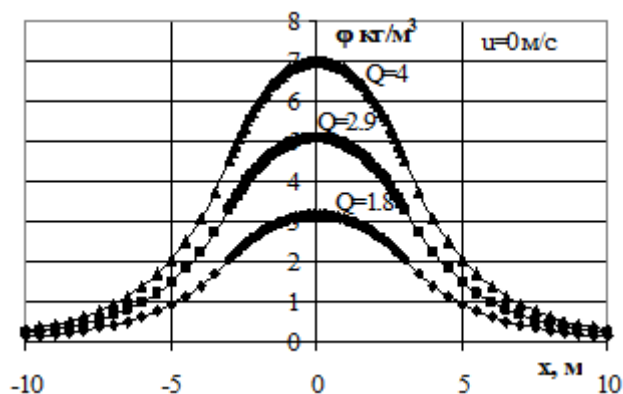


Рисунок 9.3 Розподіл концентрації забруднення за $U=0 \text{ м/с}$

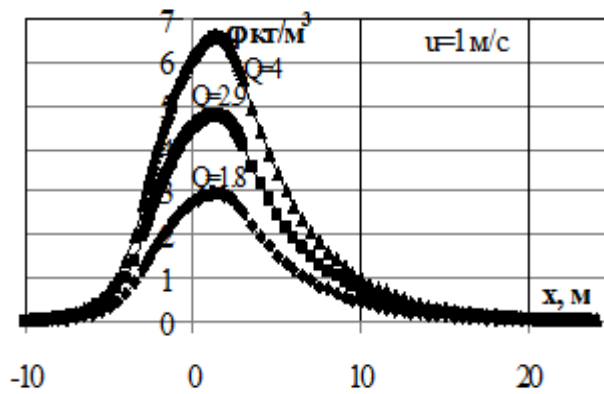


Рисунок 9.4 Розподіл концентрації забруднення за $U=1$ м/с

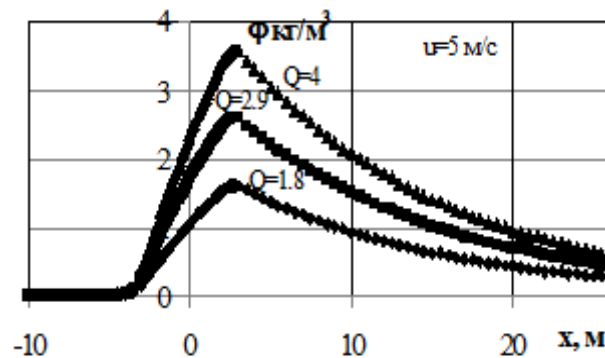


Рисунок 9.5 Розподіл концентрації забруднення за $U=5$ м/с

9.6 Питання і завдання для самоконтролю

1. Пояснити знаходження аналітичного неперервного розв'язку рівняння (9.1) в випадку, коли розподілення потужності неперервного джерела забруднення має вид (9.13).
2. Пояснити вплив на розподіл концентрації забруднення потужності неперервного джерела забруднення на ділянці (x_1, x_2) за умови заданих значень параметрів атмосфери: швидкості вітру, коефіцієнта дифузії, коефіцієнта нейтралізації.
3. Пояснити вплив на розподіл концентрації забруднення швидкості вітру за умови незмінних значень параметрів атмосфери: коефіцієнта дифузії та коефіцієнта нейтралізації.
4. Пояснити вплив на розподіл концентрації забруднення коефіцієнта дифузії за незмінних значень параметрів атмосфери: швидкості вітру та коефіцієнта нейтралізації.
5. Пояснити вплив на розподіл концентрації забруднення коефіцієнта нейтралізації за умови незмінних значень параметрів атмосфери: швидкості вітру та коефіцієнта дифузії.

6. Проаналізувати вплив швидкості вітру, коефіцієнтів дифузії і нейтралізації на розподіл концентрації забруднення, коментуючи побудовані графіки.

7. Знайти можливе місце розташування джерела забруднення $Q = 2 \cdot j$ кг/с (нове підприємство) за умови, що сумарне забруднення на відрізку $[-j; j]$ не перевищує санітарної норми $\varphi_{гдк} = 0,1 \cdot j$ кг/м³ для метеорологічних параметрів: $u = j$ м/с, $\sigma = 0,1 \cdot j$ 1/с, $\mu = 0,02 \cdot j$ м²/с, j – номер студента в журналі групи.

8. Розв'язати рівняння стаціонарного розподілу забруднення:

$$u \frac{d\varphi}{dx} + \sigma\varphi = \mu \frac{d^2\varphi}{dx^2} + \begin{cases} j, & x \in [-j, 0] \\ 0, & x \notin [-j, 0] \end{cases} + j\delta(x-j),$$

$$u = 1,5 \cdot j \text{ м/с}, \sigma = 0,2 \cdot j \text{ 1/с}, \mu = 0,01 \cdot j \text{ м}^2/\text{с}.$$

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. Теплообмін в атмосфері.
2. Сили, що визначають переміщення повітряних мас.
3. Середньорічні та сезонні температури повітря.
4. Сонячна радіація. Вплив міст на регіональні та глобальні зміни в атмосфері.
5. Забруднюючі речовини: радіонукліди, іонізуюче випромінювання, біополютанти, продукти фотохімічних реакцій, комбіноване забруднення.
6. Джерела шкідливих викидів: атомні станції, інші джерела радіонуклідів, пересувні джерела забруднення.
7. Особливості міграції атмосферного забруднення в умовах великих міст та їх моделювання.
8. Дифузія неконсервативних домішок.
9. Залповий викид забруднення в атмосферу, способи його моделювання.
10. Прикладні задачі по розрахунку забруднення міського повітряного середовища.
11. Аналіз забруднення міської атмосфери від складної мережі автомагістралей.
12. Метод локалізації для розрахунку концентрації забруднення від окремих міських об'єктів.
13. Шляхи та методи забезпечення екологічної безпеки жителів великих міст.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Абрамовский Е.Р., Карплюк В.И., Переметчик Н.Н. Атмосфера больших городов. Изд 2-е, исправленное и дополненное. Днепропетровск: Наука и образование, 2011. 350 с.
 2. Акименко В.В. Математическое моделирование экологического состояния пограничного слоя атмосферы региона. Луганск: Изд-во Вост.-Укр. гос. ун-та., 1998. 192 с.
 3. Антошкіна Л.І., Біляєв М.М., Коренюк Є.Д., Хрущ В.К. Стан довкілля: моделі та прогноз. Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2003. 328 с.
 4. Богобоящий В.В., Курбанов К.Р., Палій П.Б., Шмандій В.М. Принципи моделювання та прогнозування в екології. Підручник. Київ: Центр навчальної літератури, 2004. 216 с.
 5. Беляев Н.Н., Коренюк Е.Д., Хрущ В.К. Прогнозирование качества воздушной среды методом вычислительного эксперимента. Днепропетровск: Наука и образование, 2000. 208 с.
 6. Бруязкий Е.В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. Киев: Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. 443 с.
 7. Згуровский М.З., Скопецкий В.В., Хрущ В.К., Беляев Н.Н. Численное моделирование распространения загрязнений в окружающей среде. Киев: Наук. думка, 1997. 368 с.
 8. Ковальчук П.І. Моделювання і прогнозування стану навколишнього середовища. Навч. посібник. Київ: Либідь, 2003. 208 с.
 9. Лаврик В.І. Методи математичного моделювання в екології. Навч. посіб. для ВУЗів. Київ: Вид. дім “КМ Академія”, 2002. 203 с.
 10. Мельник Л.Г. Екологічна економіка: Підручник. Суми: ВТД “Університетська книга”, 2002. 346 с.
 11. Рудаков Д.В. Математичні моделі в охороні навколишнього середовища. Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2004. 160 с.
- Шишкарєнко Г.А. Основи екології (Математичні проблеми охорони довкілля) Львів: ЛНУ ім. Франка, 2006. 77 с.

Зміст

Вступ.....	3
1. Метеорологічні фактори, що визначають характер міграції атмосферних забруднень.....	4
1.1 Поняття та види екологічного прогнозування	4
1.2 Основні метеорологічні фактори.....	6
1.3 Теплообмін в атмосфері.....	9
1.4 Вертикальний профіль температури	9
1.5 Питання для самоконтролю	12
1.6 Тест 1. Метеорологічні фактори, що визначають характер міграції атмосферних забруднень	13
2. Закони руху повітряних потоків	15
2.1 Закони атмосферної циркуляції	15
2.2 Сили, що визначають переміщення повітряних мас	17
2.3 Питання для самоконтролю	22
2.4 Тест 2. Закони руху повітряних потоків	22
3. Вітрові системи	25
3.1 Утворення різного роду вітрових потоків	25
3.2 Види та різновиди вітрів.....	29
3.3 Характеристики вітрового потоку	31
3.4 Питання для самоконтролю	35
3.5 Тест 3. Вітрові системи.....	35
4. Основні забруднюючі речовини	37
4.1 Походження та класифікація забруднюючих речовин.....	37
4.2 Оксиди та вуглеводні	39
4.3 Продукти фотохімічних реакцій та пилові забруднення	40
4.4 Діоксини. Радіонукліди. Іонізуюче випромінювання.....	43
4.5 Біополютанти. Комбіновані забруднення.....	47
4.6 Питання для самоконтролю	52
4.7 Тест 4. Походження та класифікація забруднюючих речовин	52
5. Джерела шкідливих викидів	55
5.1 Теплові електростанції та теплоелектроцентралі	56
5.2 Чорна та кольорова металургія	58
5.3 Хімічна промисловість	61
5.4 Виробництво будівельних матеріалів	64
5.6 Рухомі джерела	66

5.7 Питання для самоконтролю	68
5.8 Тест 5. Джерела шкідливих викидів	69
6. Теоретичні основи розрахунку рівня забруднення атмосфери	71
6.1 Фізичні основи	72
6.2 Основні рівняння конвективної дифузії	76
6.3 Питання для самоконтролю	91
6.4 Тест 6. Теоретичні основи розрахунку рівня забруднення атмосфери	91
7. Практична робота 1. Дослідження особливостей поширення забруднення від постійно діючого точкового джерела в одновимірному наближенні	94
7.1 Постановка завдання	94
7.2 Завдання до лабораторної роботи	96
7.3 Аналітичне розв'язання	96
7.4 Рекомендації і вимоги до виконання завданн	99
7.5 Приклади розподілу концентрації залежно від стану параметрів атмосфери	100
7.6 Питання і завдання для самоконтролю	101
8. Практична робота 2. Дослідження особливостей поширення забруднення від постійно діючих точкових джерел в одновимірному наближенні	102
8.1 Постановка завдання	102
8.2 Завдання до лабораторної роботи	104
8.3 Аналітичне розв'язання	105
8.4 Рекомендації і вимоги до виконання завдання	105
8.5 Приклади розподілу концентрації залежно від стану параметрів атмосфери	107
8.6 Питання і завдання для самоконтролю	109
9. Практична робота 3. Дослідження особливостей поширення забруднення від постійно діючого розподіленого джерела в одновимірному наближенні	110
9.1 Постановка завдання	111
9.2 Завдання до лабораторної роботи	113
9.3 Аналітичне розв'язання	113
9.4 Рекомендації і вимоги до виконання завд	115
9.5 Приклади розподілу концентрації залежно від стану параметрів атмосфери	117
9.6 Питання і завдання для самоконтролю	118
ПИТАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ	119
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	120

Навчальне видання

Русакова Тетяна Іванівна, д-р техн. наук

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК
ДО ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ
«ТЕХНОЛОГІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО
ПРОГНОЗУВАННЯ»