

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з курсу **“Моделювання та прогнозування**
стану навколишнього середовища”
для студентів спеціальності 7.070801
усіх форм навчання

Затверджено на засіданні кафедри
як конспект лекцій
з дисципліни
“Моделювання та прогнозування
стану навколишнього середовища”,
спеціальності 7.070801.

Протокол № 1 від 28.08. 1999 р.

Суми Вид-во СумДУ 2000

Україна
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БІБЛІОТЕКА
Читальний зал № 4

Україна
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БІБЛІОТЕКА
Читальний зал № 1

Зміст

3

Передмова	6
Розділ 1 Вступ до наукових основ екологічного моделювання	7
Тема 1 Система як об'єкт моделювання	7
1.1 Загальні положення	7
1.2 Моделювання в екології	9
1.3 Характерні властивості систем	11
1.4 Взаємодія елементів системи	13
1.5 Динамічна система	14
1.6 Екологічна система	17
1.7 Системний аналіз екосистем	18
1.8 Екологічний аналіз екосистем	20
Тема 2 Критеріальні принципи моделювання екологічних систем	21
2.1 Загальні положення	21
2.2 Типи моделей	22
2.3 Характеристичні ознаки моделей	25
2.4 Класифікація моделей	25
2.5 Моделювання екосистем	26
Тема 3 Процес моделювання	28
3.1 Загальна схема моделювання об'єкта	28
3.2 Етапи побудови моделі	31
3.3 Дослідження екосистем методом моделювання	32
3.4 Моделювання наукових досліджень	33
3.5 Прогностичне моделювання	34
Розділ 2 Теоретичні основи екологічного моделювання стану атмосфери	35
Тема 4 Теоретичні основи математичного моделювання екологічного стану атмосфери	35
4.1 Загальні положення	35
4.2 Джерела забруднення атмосфери	38
4.3 Формування димового факела викиду забруднюючих речовин	40

У/К 1532

205

Тема 5 Моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері	.48
5.1 Умови, які впливають на розповсюдження домішок у зоні джерела викидів в атмосферу	.48
5.2 Моделювання дальності розповсюдження домішок в атмосфері	.49
Тема 6 Моделювання факторів впливу на забруднення атмосфери	.59
6.1 Загальні положення	.59
6.2 Вплив географічного місця розташування джерела викиду на формування рівня забруднення атмосфери	.62
6.3 Ефект температурної стратифікації атмосфери	.66
6.4 Вплив метеокліматичних умов на забруднення атмосфери	.67
6.5 Вплив параметрів джерела викидів на забруднення атмосфери	.69
6.6 Вплив параметрів пилогазоповітряної суміші викиду на забруднення атмосфери	.70
6.7 Вплив параметрів виходу факела з отвору трубки на забруднення атмосфери	.72
6.8 Вплив рельєфу місцевості на забруднення атмосфери	.73
Тема 7 Математичне моделювання концентрації домішок у приземному шарі атмосфери	.77
7.1 Моделі концентрації максимального рівня забруднення атмосфери точковим стаціонарним джерелом	.77
7.2 Модель небезпечної відстані, на якій концентрація досягає максимального рівня	.78

7.3 Модель небезпечної швидкості вітру, при якій концентрація досягає максимального рівня	.80
7.4 Моделі концентрації забруднюючих речовин на довільній відстані від джерела викиду	.82
7.5 Графічні моделі залежності концентрації домішок в атмосфері від факторів впливу	.87
Тема 8 Моделювання стану атмосфери	.89
8.1 Модель екологічного стану атмосфери	.89
8.2 Модель фізичного стану атмосферного повітря	.90
8.3 Модель гігієнічного стану атмосфери населених пунктів	.91
8.4 Математична модель ранжування стану атмосфери	.94
Висновки	.97
Список літератури	.98

У сучасних умовах науково – технічного прогресу (НТП) вплив людини на навколишнє середовище набув глобальних масштабів, порівняних до геологічних переворотів. Реальна загроза незворотних негативних наслідків антропогенного впливу на безпеку життя у зв'язку з порушенням екологічної рівноваги планети висунула питання, пов'язані з динамікою еколого-економічних систем, на передній план стратегії виживання людства.

Соціально-економічні процеси взаємодії людини з навколишнім середовищем настільки складні і масштабні, що сподіватися на їх стихійну адаптацію у сприятливому для людини напрямку нерозумно і небезпечно. Сучасна діяльність висуває задачу вивчити дію всієї сукупності факторів, які обумовлюють розвиток людства, з одного боку, та шляхів свідомого керування цим процесом, з іншого, на основі врахування прима екологічних інтересів. Сьогодні керування соціально-економічними і еколого-економічними системами стає однією з основних форм людської діяльності. Це вимагає уміння обліку і врахування великої кількості багаторівневих взаємодій, динамічного характеру розвитку систем у цілому та їх окремих елементів і підсистем. У цих умовах важливим інструментом аналізу стану довкілля виступають методи математичного моделювання.

РОЗДІЛ 1 ВСТУП ДО НАУКОВИХ ОСНОВ ЕКОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

ТЕМА 1 СИСТЕМА ЯК ОБ'ЄКТ МОДЕЛЮВАННЯ

1.1 Загальні положення

Успішний результат будь-якої справи залежить від досвіду її виконавців.

Існує декілька способів накопичення досвіду в процесі виробничої або організаційної діяльності. У найпростішому випадку при здійсненні заходів можна набути досвід шляхом серії спроб, для кожної з яких можливий лише один із двох результатів: успіх або невдача. З цією метою програма дій розділяється на кілька окремих елементів дій. Якщо при практичному виконанні деякі дії приводять до успіху, то в подальшому піддають випробуванням чергові дії з їх наміченого ряду. Коли після якоїсь дії виявляється невдача, тобто негативний результат, тоді намічений план переглядають і обирається нова послідовність дій для досягнення поставленої мети. Суть нагромадження досвіду зводиться до завдання щодо вибору такої послідовності дій, щоб кожне з них приводило до успіху, та в результаті їх здійснення була досягнута мета, тобто всі заходи було виконано з успіхом. Ця схема є типовим прикладом накопичення досвіду. Здійснюючи заходи, подібні до раніше виконаних, виконавець проходить шлях усього ланцюжка спроб вдруге значно швидше і більш якісно, ніж першого разу. Тому результат повторного виконання уже знайомих дій виявляється набагато якіснішим, а час їх виконання значно коротшим. Проте цей метод має багато недоліків. Перш за все, ланцюг послідовності елементарних дій при першому її здійсненні може виявитися занадто довгим, зайняти багато часу, вести до мети не зовсім прямим коротким шляхом. Крім того, невдачі, немінуче трапляючись у ході виконання цієї послідовності дій, мо-

жуть призвести до суттєвих матеріальних, моральних втрат (зокрема, втрати часу), ціна яких іноді багаторазово перевищує ціну досягнутого успіху. Набутий таким чином досвід надто дорогий, коли втрати методу не окупуваються успішним результатом. Отже, для уникнення цього логічно впливає, що накопичення досвіду методом спроб повинно здійснюватися не в реальних масштабах, а лише в подібних, схожих на дійсні, і не з фактичним досліджуванним об'єктом, а з його копією, заміником, імітатором. Таким чином, реальний процес накопичення досвіду може бути замінений імітацією цього процесу.

Імітація при цьому може мати різноманітний характер: від уявного оперування з об'єктами на рівні мислення, здійснюваного лише в свідомості (наприклад, обдумування), до випробування технічних моделей, створених із якогось матеріалу, а також вивчення поведінки абстрактних математичних схем (систем), в якомусь сенсі аналогічних реальному (досліджуваному) об'єкту. Імітація застосовується не лише для вироблення найбільш прийнятної послідовності дій, але й у процесі пізнання природи, її закономірностей, тобто у наукових дослідженнях. Модель, яка імітує досліджуваний об'єкт і складена відповідно до певної наукової гіпотези, може бути засобом підтвердження правильності цієї гіпотези або для її спростування. Так, тисячоліття тому передові цивілізації давнини дотримувалися геліоцентричної моделі Сонячної системи (цьому навчали ще Конфуцій і Платон). У свій час Птолемеєм була побудована геліоцентрична модель, якої і дотримувалися до того часу, коли, спираючись на фактичні дані і виміри, Коперник не побудував геліоцентричну модель, якою й послуговується наука з того часу як моделлю системи небесних тіл.

Прагнення людини створити модель своєї домівки – Землі – губиться глибоко в сивій давнині. Такими моделями були плани земельних ділянок, географічні і топографічні карти місцевості, глобуси. Вони узагальнювали досвід, були штучною імітацією місцевості, допомагали найбільш раціонально вико-

ристовувати посівні площі, здійснювати будівництво, прокладати маршрути, планувати бойові дії.

Особливого значення моделювання набуло з розвитком техніки. Оскільки створення машин вимагає, як правило, великих витрат, тому з метою забезпечення можливості вибору найбільш раціональної конструкції доцільно це здійснювати на більш дешевих фізичних моделях з імітуванням їх технічних параметрів, умов їх використання і функціонування.

Паралельно з розвитком фізичних моделей техніки і технології розвивалися теоретичні методи, які дозволяли ще до виготовлення виробу імітувати або прогнозувати техніко-економічні й інші характеристики цього проекту. Ці методи використовували, як правило, математичний апарат і мали яскраво виражений кількісний характер. Практично в усіх технічних галузях з'явилися свої спеціалізовані теоретичні моделі з загально-науковою основою. Проте чисто теоретичний підхід до розв'язання технічних проблем не є всеохоплюючим, універсальним, оскільки на практиці можливі випадки, коли виготовлення виробу не відповідає теоретичному розрахунку, або коли цей виріб у виробничих умовах поводить себе не так, як це очікувалося теоретично. Тому обов'язковою вимогою є проведення випробування моделей в умовах, які щонайближче імітують реальні.

1.2 Моделювання в екології

Застосування методів моделювання в екології має ще більше значення, ніж у техніці, вже тому, що необхідно вирішувати завдання дуже складні, недостатньо вивчені, до того ж занадто високовартісні та дуже складно прогнозовані за своїми віддаленими наслідками. Із самого принципу екології впли-

ває, що завдання наукових досліджень у галузі охорони довкілля, які виконуються за допомогою математичних методів, мають більш високий рівень складності і відповідальності за наслідки. Вони потребують більшого обсягу інформації, розвинутого методичного забезпечення, високої точності одержуваних результатів і високої вірогідності їх досягнення. Чим складніші проблеми наукового дослідження виникають в екології, тим більш досконалими повинні бути методи моделювання, тим вища їх роль і значення. У принципі будь-яку математичну модель можна назвати імітацією екологічного процесу. Проте цей термін є більш точним, якщо модель відтворює не тільки статистичний взаємозв'язок між об'єктами (елементами) системи, але й імітує розвиток самої системи в часі. Однією з переваг такої моделі є можливість враховувати вплив випадкових факторів (методами теорії ймовірності, методами теорії випадкових процесів, методами стохастичної імітації, які звичайно прийнято називати методами статистичного моделювання).

Об'єкти екологічного моделювання визначаються, таким чином, взагалі. Якщо говорити про моделювання в екології, то необхідно конкретизувати об'єкт реальної дійсності, модель якого створюється і визначається. У цілому можна сказати, що в усіх випадках основним об'єктом дослідження за допомогою моделей буде екологічна система. Це поняття, в принципі, не нове, проте використовуючи його, необхідно точно розуміти його зміст. Поняття системи давно використовується у різних галузях знань і відіграє важливу роль у формуванні і методології різних наук.

Системами є об'єкти живої природи, економічні і виробничі відносини між людьми, частини нашого Всесвіту (макросвіт) і того мікросвіту, який створює основу будь-якої речовини. Системами називають сукупності спеціальних символів, які складають математичний опис різних процесів і явищ, реально існуючих у природі. Системами є всі створені людиною механізми, пристрої, технології.

Всі реально існуючі в природі системи, побудовані шляхом абстрактного мислення, володіють визначеною сукупністю характерних особливостей, наявність яких дає можливість об'єднувати ці поняття, різні за своїм конкретним вираженням, у загальне збірне поняття системи.

Зокрема, в біології конкретизується поняття системи як організму в цілому або його частини (нервової системи, обміну речовин і т.п.). У математиці – це системи рівнянь, системи операцій, системи позначень і т.д. В екології – екосистема, її компоненти і т.д.

Зауважимо, що слово "комплекс" означає сукупність предметів або явищ, які складають одне ціле. У той же час "система" визначається як "множина елементів із відношеннями і зв'язками між ними, що створює визначену цілісність". При цьому береться до уваги той факт, що система як упорядкована цілісна множина взаємопов'язаних елементів, які володіють структурою і організацією, "у своїй взаємодії із середовищем демонструє відповідну поведінку", визначену як впливом середовища, так і "власними цілями, що мають на увазі перетворення середовища, підпорядкування його своїм потребам" та що ефект функціонування системи в цілому може відрізнитися від сумарного ефекту її складових частин.

1.3 Характерні властивості систем

Звертаючись до розгляду екологічних систем, слід зупинитися на їх характерних особливостях, які властиві всім цим екосистемам. Перш за все – це наявність структури.

Структура системи – це сукупність її складових частин, блоків, вузлів, ланцюгів, елементів.

Відміна системи від простої упорядкованої сукупності непов'язаних елементів полягає в наявності зв'язків між її складовими. Причому кожен із цих зв'язків має визначене функціональне значення і характеризується напрямком цієї функції. Визначення структури для кожної системи є поняття від-

носне – одну й ту ж систему можна розглядати як таку, що складається з більш великих або більш малих блоків та ланцюгів. Це залежить від мети і необхідності розглядати більш великі чи малі частини системи.

Будь-яка система якоюсь мірою зазнає впливу зовнішнього середовища. У свою чергу вона сама може здійснювати на це середовище деякий вплив. Тому іноді вивчення системи доцільно розповсюдити і на деяку частину її середовища. Іноді, навпаки, слід виключити із складу системи деякі об'єкти і віднести їх до зовнішнього середовища. Все це і залежить від постановки завдання.

В усіх випадках систему можна характеризувати кількісно в кожний момент часу. При цьому число її кількісних характеристик у свою чергу є кількісною характеристикою цієї системи.

Розвиток у часі, зміна кількісних характеристик – це невід'ємна особливість будь-якої системи.

Характеристики екосистем розвиваються в загальному випадку у взаємній залежності від впливу зовнішнього середовища. Чисто умовно зовнішні характеристики можна поділити на два види: ті, що швидко змінюються в часі, і ті, що змінюються повільно. Тому швидкоплинні прийнято називати в моделюванні тимчасовими (миттєвими) характеристиками, а повільно змінювані – параметрами системи.

Оскільки у функціонуванні реальної екосистеми немінуче беруть участь випадкові фактори, які перетворюють процеси зміни миттєвих характеристик у випадкові процеси, то всі реально існуючі системи мають імовірний характер. У тих випадках коли випадкові коливання характеристик дуже незначні, їх можна не враховувати. Тоді система вважається за детерміновану. Тобто такою, яка не зазнає впливу дій імовірного характеру. Інакше – система ймовірна.

Таким чином, будь-яка система може характеризуватися такими особливостями: структурою, наявністю зв'язків між її складовими, залежністю від зовнішнього середовища, впливом

на зовнішнє середовище, наявністю кількісних характеристик, які визначають стан системи в кожен момент часу, зміною стану системи з часом, участю деяких імовірних факторів у функціонуванні системи.

Тому на практиці під системою ми будемо розуміти поняття, для якого характерні зазначені особливості.

1.4 Взаємодія елементів системи

Під взаємодією елементів системи розуміють режим (процес) спільного функціонування елементів, при якому поведінка (або властивості одного елемента) в загальному випадку залежать від умов, визначених поведінкою або властивостями інших елементів цієї системи.

Взаємодія виступає як результат впливу, який здійснюють елементи системи один на одного.

Так, якщо розглядати систему (S), яка складається з елементів ($C_1; C_2; C_3; \dots, C_N$), то вплив одного елемента (C_i) цієї системи на інший елемент (C_j) цієї ж системи визначається вхідними сигналами (X), які надходять від елемента (C_i) до елемента (C_j).

Вихідний сигнал (Y) елемента (C_j), сформований з урахуванням цього елемента, трансформується взагалі при передачі його реальним каналом зв'язку і надходить до елемента (C_j) вже як вхідний сигнал, що викликає зміни у поведінці цього елемента.

При формуванні формалізованого опису взаємодії елементів системи звичайно дотримуються припущення, що ця взаємодія достатньо повно та точно описує в рамках механізму обміну сигналами. Тому для формального опису взаємодії між елементами (C_i) та (C_j) системи (S) достатньо мати наступні 4 базові моделі:

- формування вихідного сигналу (Y) дії елемента (C₁) системи;
- сполучення елементів мережею каналів зв'язків, які забезпечують передачу дії (сигналу) між елементами;
- трансформація сигналу в процесі проходження його через реальний канал зв'язку;
- прийом вхідного (X) сигналу та поведінка елемента (C₁), який прийняв його, в результаті впливу дії цього сигналу.

Доцільно зазначити, що аналогічний підхід доречний також і для випадку взаємодії системи з зовнішнім середовищем. При цьому об'єкт зовнішньої системи, який впливає на один або декілька елементів досліджуваної системи, повинен бути описаний у крайньому випадку моделлю формування цього вихідного сигналу. У свою чергу, об'єкт зовнішнього середовища, який сприймає сигнал від елементів системи, також повинен бути описаний у крайньому випадку моделлю прийому вхідного сигналу.

При цьому вивчення моделей трансформації і сполучення можна виконувати спільно для досліджуваної системи і зовнішнього середовища.

1.5 Динамічна система

Усі явища і процеси матеріального світу ми звикли розглядати у просторі і часі.

У найпростішому випадку механічного руху мова про переміщення, яке інтерпретується як зміна положення тіла за деякий проміжок часу. Незважаючи на істотність цього міркування, воно вже має в собі риси формалізації процесу. В кожен момент часу (t) у певний проміжок {T} тіло знаходиться саме в цілком визначеному положенні (Z_i) із деякої множини {Z} можливих. Це положення описується його координатами у просторі. Отже, якщо мова йде про рух тіла по деякій прямій,

то Z – відстань від початку відліку. Якщо розглядати рух тіла на площині, то Z – вектор з координатами (Z_x, Z_y) у прямокутній системі координат. Якщо рух тіла відбувається в тривимірному просторі, то Z – вектор із координатами (Z_x, Z_y, Z_z) і т.д.

Таким чином, переміщення – це перехід тіла з одного положення (Z_{t_1}) в інше (Z_{t_2}) за проміжок часу $(t=t_1 - t_2)$, що складає час цього переходу.

У механіці переміщення відбувається під дією сил і має динамічний характер (dynamis – сила). Ця концепція в основних своїх рисах правильна і за межами механіки, тому має широке розповсюдження.

В екології замість "положення" прийнято говорити "стан", тобто Z_t – це стан екосистеми в момент (t) . При цьому цей стан може характеризуватися досить великою кількістю так званих "координат" системи: $Z_t(Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n)$. Більше того, замість "переміщення" вживається поняття зміни стану (руху) із (Z_{t_1}) до (Z_{t_2}) . Воно характеризується відображенням стану $Z(t)$ множини (T) в множину (Z) , де Z – це множина стану системи, а T – множина моментів часу.

Сукупність стану $Z(t) \in Z$, що відповідає в перебігу ходу даного руху $Z(t)$ усім значенням $t \in T$, називається траєкторією руху. У такому розумінні рух системи охоплює різні форми руху матерії.

Рух у загальному випадку відбувається внаслідок причин більш загальних, ніж сила. Тому в сучасній інтерпретації "динамічний" означає "причинний". Таким чином, під динамічною системою (в широкому сенсі) розуміють об'єкт, який знаходиться в кожен момент (t) часу (із множини T) в одному із можливих станів Z_t (із множини Z) і який може переходити (з часом) із одного стану в інший під дією зовнішніх і внутрішніх причин, здійснюючи при цьому рух $Z(t)$.

Щоб врахувати зовнішні причини, необхідно розглянути взаємодію динамічної системи із зовнішнім середовищем. Ця взаємодія здійснюється шляхом дії зовнішнього середовища на динамічну систему, з одного боку, і дії динамічної системи на

зовнішнє середовище - з іншого. Такого роду дії в теорії аналізу систем називають сигналами, а сам процес взаємодії системи із середовищем розглядається в межах механізму обміну сигналами. Отже, сигнал (X) , який надходить із зовнішнього середовища в досліджувану систему в момент (t) називають входним сигналом (Xt) . Він характеризується координатами $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_n)$ і є елементом множини $\{X\}$ входних сигналів.

Аналогічно, вихідний сигнал (Yt) , який надходить із системи в зовнішнє середовище в момент (t) , описується координатами $(Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$ і є елементом множини $\{Y\}$ вихідних сигналів системи.

Динамічна система як математичний об'єкт містить у своєму описі наступні механізми:

- механізм зміни стану під впливом дії внутрішніх причин (без втручання зовнішнього середовища);
- механізм прийому входного сигналу і зміни свого стану під дією цього сигналу;
- механізм формування вихідного сигналу як реакції системи на внутрішні і зовнішні причини зміни свого стану.

Звичайно ці механізми описують так званими операторами (особливо в теоретичних дослідженнях):

- оператор переходу (H) системи в новий стан;
- оператор виходу (G) системи із попереднього стану.

Ці оператори реалізують відображення стану системи:

$$H: T*Z*X \rightarrow Z,$$

$$G: T*Z*X \rightarrow Y.$$

Проте такі завдання системи виявляються надто загальними (формальними) і недостатньо визначеними. Для формального опису елементів системи доцільно використати математичну схему динамічної системи в широкому сенсі, у т.ч. стохастичної, яка враховує дію випадкових факторів за допомогою математичного апарату теорії випадкових процесів, зокрема, класу випадкових процесів із дискретним втручанням випадку.

1.6 Екологічна система

Під екологічною системою треба розуміти систему, конкретний зміст якої пов'язаний із відношеннями в галузі екології, тобто відношеннями живих організмів з їх середовищем перебування і, зокрема, в галузі взаємовідносин людини і довкілля. Такі екосистеми мають специфічні особливості, які обумовлюють їх властивості. Тому ставлячи перед собою завдання дати будь-який загальний виклад практичних прийомів побудови моделей екологічних систем, необхідно зазначити їх особливості, які багато в чому полегшують виконання цього завдання.

Так, екосистеми охоплюють своїми взаємозв'язками не лише природне середовище, але й соціальну та всі виробничі й інші галузі народного господарства. Тому об'єктами екосистем можуть бути будь-які елементи природного середовища, промисловості, транспорту, сільського господарства, адміністративного управління, культури, науки і т.п.

Якщо розглядати окремо будь-який елемент екосистеми, то неважко побачити певну особливість у його функціонуванні – зміна характеристик цього елемента веде до зміни характеристик усієї системи і в результаті цього до зміни її впливу на зовнішнє оточуюче середовище. У свою чергу зміни зовнішнього середовища викликають зміни в екосистемі її внутрішнього стану.

Для того щоб задати систему, необхідно (і достатньо) здійснити (виконати) опис усіх її елементів і опис всіх її зв'язків взаємодії між цими елементами. Оскільки характер функціонування системи залежить від умов оточуючого середовища, то одним із основних завдань дослідження є саме вивчення взаємозв'язків цієї системи з зовнішнім середовищем (крім випадків так званих автономних систем, які не залежать від оточуючого середовища). Для простоти математичного опису зру-

чно зовнішнє середовище зобразити у вигляді сукупності елементів (за аналогією елементів самої екосистеми) лише з тією різницею, що цілісної моделі поведінки цих елементів створювати не має потреби. Тому досить задати її лише в тій її частині, яка належить до формування відповідних дії (впливу) цього середовища на елементи екосистеми.

Використання уніфікованого математичного опису для елементів системи і об'єктів зовнішнього середовища, а також для взаємодії елементів системи між собою і з оточуючим середовищем допомагає спрощенню моделей. Крім цього, з'являються умови для створення єдиних прийомів і засобів дослідження екосистеми. Тому на перший план висувається потреба в розробці уніфікованих моделей і типових математичних схем первинної формалізації об'єктів екосфери, які становлять елементи складних екосистем.

1.7 Системний аналіз екосистем

Розгляд досліджуваного об'єкта матеріального світу як системи, що складається із взаємодіючих елементів, побудова математичної моделі для нього і дослідження його властивостей методом моделювання складає сутність системного підходу.

Системний підхід має вирішальне значення в дослідженні операцій, системотехніці, у сфері проектування, створення автоматизованих систем управління (у т.ч. в природоохоронній діяльності), у кібернетичі, фізіології, біології (особливо молекулярній), хімії, економіці (особливо її математичній частині), в багатьох інших науках. Широке застосування системний підхід знайшов в екології та в управлінні природокористуванням.

Сукупність методів і прийомів дослідження, які входять до арсеналу цього самостійного наукового напрямку, складають предмет системного аналізу.

Системний аналіз є методологічною базою моделювання систем. Він становить загальний раціональний підхід до вирішення складних еколого-економічних та інших проблем. Він забезпечує вибір бажаного шляху розвитку серед множини можливих альтернатив на основі комплексного вивчення структури системи, мети розвитку, умов розвитку і т.д. Він передбачає створення математичної моделі системи, що вивчається, визначення набору її цілей, керуючих дій і впливів, аналіз наслідків можливих рішень, оцінку чутливості результатів до змін припущень моделей і т.д.

Природні, економічні, а тим більш еколого-економічні системи включають у себе різноманітні процеси (біологічні, фізичні, хімічні, механічні, соціальні, економічні і т.д.).

Жорстко підходячи до моделювання екосистем, необхідно включати в модель всі її елементи без винятку – тільки в такому випадку можна сподіватися врахувати всі можливі реакції системи на зовнішній вплив. Оскільки це надзвичайно складно, а іноді й зовсім неможливо, то застосовують різні прийоми і способи для зниження кількості елементів та спрощення системи.

Одним із резервів соціально-економічного розвитку суспільства є комплексний підхід до розв'язання задач управління природокористуванням з використанням принципів системного аналізу. Реалізація цього підходу в межах досліджуваної проблеми вимагає програмованості і обліку ієрархічності та багатозначності зв'язків. Виходячи з основних принципів системного аналізу, його застосування в сфері управління природокористуванням найбільш доцільне при розв'язанні комплексних проблем політики, стратегії та тактики управління, а також при вивченні еколого-економічних процесів суспільного розвитку, рівня забруднення довкілля, якості життєвого середовища і т.п.

Системний аналіз включає послідовність наступних етапів: вивчення існуючої ситуації; визначення проблем, які необхідно вирішувати; визначення загальної мети системи в цілому та її елементів окремо; порівняння різних альтернативних шляхів досягнення поставленої мети; пошук та вибір оптимального шляху на базі науково розроблених критеріїв оцінки ефективності; побудова моделей залежності між елементами системи; дослідження кількісних і якісних відношень, її функціональних характеристик, ступеня взаємних дій і наслідків; постановка завдань щодо вдосконалення системи; визначення кількісних і якісних показників ефективності діяльності системи; прийняття управлінського рішення.

1.8 Екологічний аналіз екосистем

Системний підхід широко використовується не лише в галузі природокористування, але й в екології. Наприклад, в питаннях екологічного аналізу екосистем та охорони довкілля.

Екологічний аналіз екосистем складається з послідовного виконання наступних етапів: аналіз досліджуваної природної компоненти (об'єкт середовища) як фізичного тіла (тобто фізико-хімічні та інші його параметри); аналіз даної компоненти як екологічної складової (роль та участь у забезпеченні життя); аналіз компоненти як структурного елемента природної екосистеми (роль та участь у природних кругообігах); аналіз компоненти як джерела природних ресурсів (речовин, хімічних елементів, матеріалів, енергії, сил і т.п.); аналіз внутрішніх міжелементних взаємозв'язків; аналіз зовнішніх взаємозв'язків (вхідні та вихідні сигнали); основні (головні) висновки за результатами екологічного аналізу досліджуваної компоненти (об'єкта, середовища).

ТЕМА 2 КРИТЕРІАЛЬНІ ПРИНЦИПИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

2.1 Загальні положення

Введемо деякі основні поняття.

Модель – це:

- фізична (речовинно-натуральна) або знакова (математична, логічна) подібність реального об'єкта (звичайно спрощеного), явища, процесу, системи;
- зменшена подібність реального об'єкта (діюча модель або тільки імітуюча форму (макет) об'єкта);
- схема, зображення або опис деякого явища, процесу в природі чи суспільстві.

Моделювання – це метод дослідження складних об'єктів, явищ, процесів шляхом їх спрощеного імітування (натурального, математичного, логічного), що базується на теорії подібності.

Отже, модель – це математично реалізована або розумово уявлена система, яка відображає або відтворює досліджуваний об'єкт та яка може замінити його так, що її вивчення дасть нам можливість одержати інформацію про досліджуваний об'єкт.

Призначення моделі може бути різним, оскільки моделі використовуються з різною метою:

- у випадку неможливості безпосереднього дослідження процесу внаслідок відсутності теорії цього процесу для одержання даних про нього, накопичення інформації та прогнозу поведінки цього об'єкта;
- при удосконаленні наукової теорії для уточнення поведінки та кількісних співвідношень досліджуваного об'єкта на основі кількісних даних;

- при утрудненні застосування теорії з метою одержання характеристик об'єкта дослідження;
- при використанні як проміжного ланцюга між теорією і практикою;
- при встановленні зв'язків між різними теоріями;
- при перевірці теорії;
- при утрудненні безпосереднього проведення досліду на об'єкті;
- при дослідженні об'єктів, недоступних безпосередньому спостереженню;
- з метою економії коштів, часу і т.п.

Функції моделей зводяться до наступних: описувальна, вимірювальна, пояснювальна, інтерпретаторська, провіщувальна (прогнозна), критеріальна.

До моделей ставлять головну вимогу: будь-яка модель повинна бути подібна в основних рисах оригіналу, і в той же час відмінна від нього, тобто не мати тих його характеристик, які заважають його вивченню за допомогою цієї моделі.

2.2 Типи моделей

Можна визначити такі основні типи моделей: матеріальні (предметні), формальні (логіко-математичні) та змішані (рисунок 2.1).

Тип матеріальних моделей представляють групи моделей фізичних, предметно-математичних та прямої і непрямої аналогії.

Матеріальна (предметна) модель – це матеріальний об'єкт, подібний до зразка і може замінити його в експерименті (дослідженні). Така предметна модель застосовується у випадку, коли необхідно конкретно вивчити певний процес (а не його загальні риси) при заданих режимних умовах (тобто його конкретні параметри).

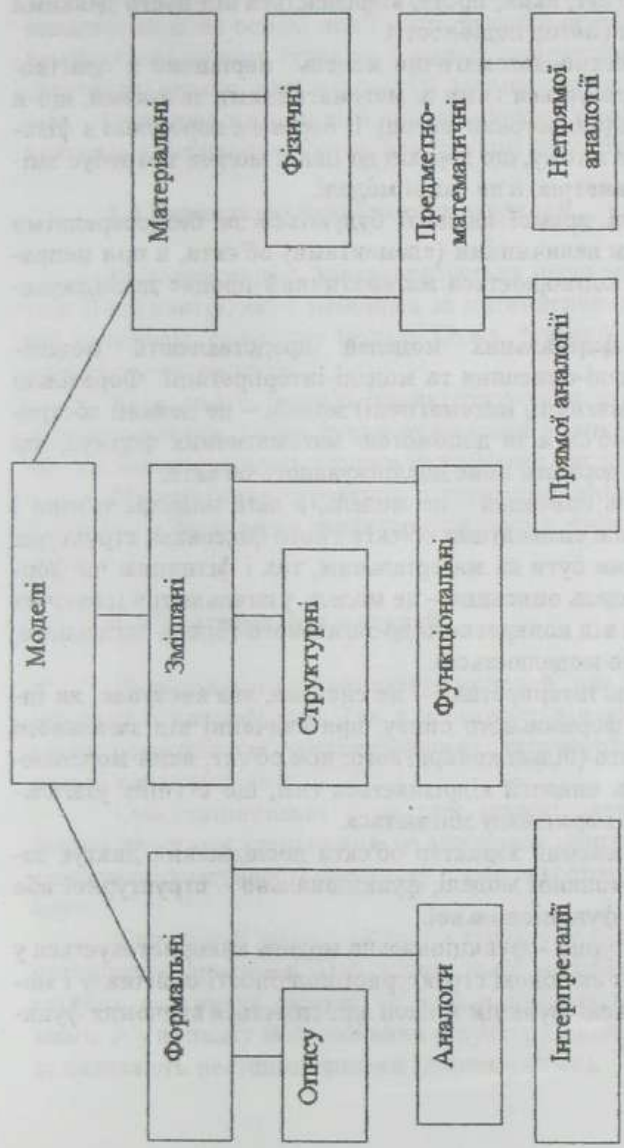


Рисунок 2.1 – Основні типи моделей екосистем

Фізична модель – це подібний до оригіналу за фізичною природою об'єкт, який, проте, відрізняється від нього деякими параметрами (метод подібності).

Предметно-математична модель порівняно з оригіналом характеризується тими ж математичними зв'язками, що й сам оригінал (аналоговий метод). Її перевага порівняно з фізичною полягає в тому, що перехід до іншої моделі потребує зміни лише параметрів, а не самої моделі.

Моделі прямої аналогії будуються за безпосередніми зв'язками між величинами (елементами) об'єкта, а при непрямій аналогії відтворюється математичний процес досліджуваного об'єкта.

Тип формальних моделей представляють моделі-аналоги, моделі-описання та моделі-інтерпретації. Формальні (логіко-математичні, математичні) моделі – це деякий абстрактний опис об'єкта за допомогою математичних формул, які дозволяють одержати опис досліджуваного об'єкта.

Модель описання – це модель, в якій описані зв'язки і залежності між елементами об'єкта і його фіксована структура. Оригінал може бути як матеріальним, так і фізичним чи формальним. Модель описання – це модель узагальнення існуючих боків об'єкта від конкретного до загального (більш загального, ніж об'єкт, що моделюється).

Модель інтерпретації – це система, яка виступає як інтерпретатор формального опису, при вивченні від загального до конкретного (більш конкретного, ніж об'єкт, який моделюється). Модель аналогії відрізняється тим, що ступінь узагальнення моделі і оригіналу збігаються.

Комплексний характер об'єкта дослідження диктує застосування змішаної моделі, функціонально – структурної або структурно – функціональної.

Структурно – функціональна модель використовується у випадку, коли на основі структурної подібності оригіналу і моделі та на основі функцій моделі здійснюється вивчення функцій оригіналу.

Функціонально – структурна модель використовується у випадку, коли на основі подібності функцій оригіналу і моделі та на основі знання структури моделі прогнозують структуру оригіналу (ступінь достовірності її значно менша, ніж структурно – функціональної моделі, оскільки фактор структури більше визначає властивості об'єкта, ніж функції його структури).

2.3 Характеристичні ознаки моделей

Будь-яка модель характеризується перш за все структурою її елементів, які є змінними за математичною природою і які складають структуру моделі. Отже, "змінні" це те, з чого складається структура.

Крім цього, модель характеризується взаємозв'язками між елементами, тобто функціональними діями між елементами, які характеризують напрям та характер цих дій.

Математична структура є лише тоді моделлю, коли її елементи є фізичними характеристиками досліджуваного процесу.

2.4 Класифікація моделей

Розраховуючи різноманіття моделей, для зручності вдаються до їх класифікації. Так, в залежності від об'єкта моделювання розрізняють субстанціональні, структурні та функціональні класи моделей.

Субстанціональні – це такі моделі, матеріал яких за своїми якостями ідентичний до матеріалу оригіналу, коли досліджувані властивості оригіналу є властивостями його матеріалу.

Структурні моделі імітують структуру або ж внутрішню організацію оригіналу. При цьому, якщо моделюють структуру стійких, усталених систем, то моделі називаються стаціонарними. А у випадку моделювання структури процесів такі моделі називають нестаціонарними (динамічними).

Функціональні моделі імітують спосіб поведінки оригіналу. Прикладом функціональної моделі може бути так званий чорний ящик, внутрішня структура якого нас не цікавить або непосильна для вивчення, проте залежність між входом і виходом становить предмет дослідження.

Як структура, так і функції можуть бути формалізованими (тобто представлені символами математично) або фізичними (тобто мати матеріальне вираження).

Залежно від ступеня випадковості моделі класифікують на два класи: детерміновані і схоластичні.

Моделі детерміновані – це такі, у яких випадковий фактор відсутній або ж настільки незначний, що його можна ігнорувати при моделюванні або детермінувати (тобто усувати).

Стохастичні (вірогідні) моделі – моделі, у яких враховується вплив факторів (параметрів) при умові, що відомі закони їх протікання.

Взагалі можна сказати, що не так сама структура, як головним чином ступінь впливу факторів та їх участь диктують вибір того чи іншого виду моделі. Саме залежно від того, неперервні чи дискретні (перервні) змінні фігурують у моделі, ці моделі також називають неперервними або відповідно дискретними.

Процеси також можуть бути неперервними або дискретними, тому моделі для їх вивчення бувають неперервними або дискретними. Наприклад, комп'ютер – це прилад дискретної дії, отже, і модель на ньому також дискретного типу.

2.5 Моделювання екосистем

Завдання дослідження екологічних систем зводиться у більшості випадків до визначення та розробки такої структури цієї системи (або такого режиму її роботи), при якій функціонування системи дає найкращий (найбільший) екологічний ефект (результат), досягнення найбільш бажаної мети.

У найпростішому випадку таке завдання вдається виконати за допомогою окремих повних розрахунків на базі знання головних особливостей та закономірностей досліджуваної системи, а також на результатах спостереження за роботою існуючих подібних систем (моніторингу навколишнього середовища). Але у багатьох випадках ці розрахунки можуть бути неточні через недосконалість методичної бази, тобто через незнання процесу або через недостатність чи недостовірність інформації, а також у зв'язку з тим, що використаний алгоритм розрахунку не враховує деякі закономірності та важливі особливості реальної системи.

Оскільки визначити наперед оптимальну структуру системи або найбільш вигідний режим її роботи у багатьох випадках неможливо, то для її пошуку використовується сама структура: шляхом оптимізації системи за допомогою математичної моделі або ж за допомогою натурального експерименту. Але оскільки натуральний експеримент - це завжди дуже дорогий захід, а іноді до того ж і неможливий за технічними, економічними й іншими причинами або через небезпеку жертв, то в такому випадку перевагу віддають методу математичного моделювання. Особливо доцільне матмоделювання, коли поведінка моделі відображає поведінку самої системи з достатньо високим ступенем точності. Тоді така модель може бути використана і для визначення найбільш вигідного режиму роботи системи і для оптимізації структури цієї системи.

Процес дослідження системи, її роботи, її оптимізації, виконаний на математичній моделі цієї системи, називається моделюванням.

Якщо при відтворенні на моделі поведінки екосистеми доводиться імітувати дії певних випадкових факторів, то таке моделювання називається статистичним. Зазначимо, що з розвитком швидкодіючої комп'ютерної техніки ці методи стали результативним і потужним засобом вивчення складних систем.

Підкреслимо, що під імітаційним моделюванням екосистем розуміють процес, якій відтворює не лише структуру та статичний взаємозв'язок складових частин системи, але й імітує динаміку розвитку цієї системи в часі.

Взагалі ж в імітаційну модель можуть бути включені тільки окремі блоки системи, які дозволяють одержати ті чи інші характеристики ефективності роботи цієї системи, а також виконувати вибір оптимальних значень деяких параметрів, при яких ефективність її функціонування виявляється максимальною.

Таким чином, термін "моделювання" може бути застосований у наступних випадках:

- під моделюванням іноді розуміють процес побудови моделі;
- моделюванням іноді називають також процес відтворення (репродукування) динаміки функціонування системи за допомогою уже побудованої імітаційної моделі (технічної або математичної);
- вживають цей термін взагалі для методу дослідження, який здійснюється за допомогою будь-якої моделі, але з обов'язковим відтворенням її динаміки.

ТЕМА 3 ПРОЦЕС МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Загальна схема моделювання об'єкта

Узагальнюючи, наведемо принципову загальну схему моделювання об'єкта можна відмітити такі його послідовні (обов'язкові) етапи: постановка завдання, побудова моделі, дослідження (вивчення) моделі, використання одержаних результатів.

Постановка завдання включає такі дії: виділення об'єкта дослідження, його структури, взаємовідношень, тобто предмет

дослідження (оскільки всі сторони і все різноманіття цих відношень часто непотрібно або й взагалі неможливо врахувати). Далі, визначивши об'єкт, структуру і предмет, здійснюють накопичення даних та їх теоретичне осмислення.

Побудова моделі включає такі послідовні дії:

- побудова концептуальної моделі (тобто ідеальної, розумової), описаної звичайною природною мовою, де чітко фіксуються початкові вихідні положення для подальшої побудови моделі;
- побудова наукової моделі на базі вихідних положень із використанням формальних (математичних) методів та співвідношень;
- побудова математичної моделі, яка відрізняється від наукової наявністю значної абстракції, спрощення та зміни, тобто процесу формалізації. При цьому при моделюванні вибирають значні важливі сторони об'єкта, намагаючись, щоб модель мала якнайменшу кількість зв'язків і сторін оригіналу (проте не на шкоду правдоподібності), керуючись ступенем достовірності та реальними можливостями розв'язання задачі наявним математичним апаратом. Як правило, одержати результати бажаної значущості не завжди вдається. Тому застосовують так званий ітераційний метод побудови моделі. Він полягає в тому, що спочатку згідно з цією схемою будують модель першого наближення, аналізують її, а одержані з її допомогою результати порівнюють з експериментальними (чи іншими аналогічними) результатами. Якщо результати не задовольняють, то корегують модель і знову повторюють процес вивчення об'єкта. Так діють до того часу, поки результати не будуть задовольняти дослідника (рисуюнок 3.1).



Рисунок 3.1 - Загальна схема моделювання об'єкта

Для дослідження (вивчення) об'єкта за допомогою моделі застосовують різні методи, найбільш розповсюджені з яких аналітичний і чисельний.

Аналітичний метод дає можливість розв'язувати задачі у загальному вигляді, але його обмежені можливості через недостатній розвиток сучасного математичного апарату не дозволяють широко застосувати його в моделюванні.

Чисельний метод пов'язаний із значними працезатратами (проте це не суттєво за наявності комп'ютерного обладнання). Більш значним його недоліком можна вважати те, що у цьому випадку задача розв'язується для конкретних даних і не має загального значення.

На останньому етапі одержані за допомогою моделі результати застосовують з практичною метою. Проте наскільки доцільно і корисно їх використають залежить від професійного рівня спеціалістів.

3.2 Етапи побудови моделі

Відповідно до загальної схеми моделювання розглянемо більш детально процес побудови моделі. Він складається з трьох послідовних етапів: концептуалізація, математичний опис, аналіз моделі.

Концептуалізація – це словесний опис системи (точніше, це опис уявної розумової моделі цієї системи), який включає такі дії:

- точне формулювання завдання (запитання), яке вимагає відповіді в результаті дослідження поведінки екосистеми;
- визначення основних (найважливіших) змінних, від яких залежить поведінка системи (результат);
- визначення інтервалу часу, протягом якого слід вивчати (досліджувати або розглядати, спостерігати) поведінку системи;
- визначити перелік параметрів, які при цьому треба враховувати;
- визначити перелік діапазонів для цих параметрів та інших вихідних даних;
- побудувати причинну діаграму системи, що вказує, які саме змінні і їх комбінації (фактори) впливають на кожну змінну окремо і в якому напрямку (зменшення, збільшення). При цьому виявляються петлі зворотного зв'язку (звичайно, якщо вони існують у цій системі).

Математичний опис моделі системи включає такі послідовні дії:

1 Будується так звана потокова діаграма, яка відповідає причинній діаграмі, побудованій на першому етапі. Потокова діаграма являє собою пов'язану стрілками сукупність позначень елементів та їх зв'язків (вхідних і вихідних сигналів через кожен із них), а також аналітичних співвідношень та табличних залежностей.

2 Даються (наводяться) аналітичні залежності між факторами (комбінаціями змінних).

3 Вказуються залежності (аналітичні вирази) форм, видів швидкостей та інших характеристик і властивостей зв'язків між змінними.

Аналіз моделі вимагає таких дій:

- виконання чисельних розрахунків моделі (звичайно на комп'ютері, як правило, за допомогою спеціальних алгоритмів і програм);
- порівняння результатів з уже відомими даними, які характеризують поведінку досліджуваної системи;
- виявлення параметрів, до зміни яких модель найбільш чутлива;
- аналізується варіювання (зміни) тих параметрів, які впливають на розв'язання поставленого питання (завдання), заради якого виконується моделювання;
- дається оцінка придатності моделі для розв'язання цього питання. Якщо модель недостатньо придатна, то можуть бути змінені її структура, фактори або змінні, які в ній враховані, або ж діапазони їх змін і т.д.

Після такої корекції моделі всі три етапи побудови моделі можуть бути повторені з метою досягнення більш задовільного результату. Таке послідовне удосконалення моделі повторюється до того часу, поки модель не буде відповідати вимогам дослідження. Тобто буде визнана достатньо задовільним наближенням до реальної системи. Цей метод набув назву ітераційного (покрокового) наближення.

3.3 Дослідження екосистеми методом моделювання

Дослідження, які виконуються за допомогою моделей, можна звести до таких видів:

- дослідження структури системи (її уточнення);

- дослідження зв'язків між елементами структури (виявлення наявності зв'язків та їх впливу);
- дослідження зв'язків між системою (або її окремими елементами) з зовнішнім середовищем (тобто тих змін, які викликані цими зв'язками);
- дослідження окремих елементів системи як структурно-функціональних одиниць (тобто встановлення межі їх зміни та впливу);
- дослідження режимів роботи системи.

3.4 Моделювання наукових досліджень

Практично будь-яке дослідження являє собою процес, який починається з відчуттів та сприйняття навколишньої дійсності і закінчується формулюванням законів і теорій, які описують структуру, динаміку і розвиток досліджуваної системи. Порядок пізнавальних процедур може бути різноманітним, проте всяке дослідження містить у собі елементи, загальні для них усіх. Існує стандартна модель проведення наукового дослідження. Так, дослідження завжди починається із розуміння його мети і завдання. Подальші процедури включають низку вказівок для досягнення поставленої мети.

У природничих науках найбільш широко знаходять своє відображення дві основні схеми наукового дослідження: одна спирається на метод дедукції, інша – на метод індукції.

Дедукція – це формулювання висновку логічним шляхом із декількох посилок. Дедуктивні розумові висновки описуються правилами і символами математичної логіки. Вона є формою мислення, засобом формування висновків від найбільш загального до менш загального, приватного, більш часткового. Тобто від наукової абстракції до конкретики.

Дедуктивний шлях дослідження передбачає наступну послідовність дій: формування мети та завдань; формування

апріорної моделі системи; формулювання гіпотези; проведення експерименту; перевірку гіпотези та її уточнення у разі необхідності; теоретичні узагальнення, формулювання законів і теорій; прогноз стану системи; побудова моделі дослідження системи.

Індукція – це формулювання нового знання шляхом узагальнення приватних дослідів, ситуацій, випадків. Вважається, що індукція більш сприяє дослідженню невідомих галузей знання, виявленню нових закономірностей. Проте у чистому вигляді в наукових дослідженнях вона не використовується і не є засобом дослідження. Сам же апарат одержання знання значною мірою пов'язаний з інтуїцією, аналогією та прозрінням. Тобто підсвідомим шляхом формуються допущення, які потім оформлюються за правилами логіки.

Індуктивний шлях дослідження складається з послідовних етапів: формування мети і завдання; одержання необхідної (достатньої) інформації та її упорядкування; емпіричні узагальнення інформації; теоретичні узагальнення, формулювання законів і теорій; прогноз; побудова моделі досліджуваної системи.

3.5 Прогностичне моделювання

Взагалі практично будь-яка модель за своєю суттю уже є прогностичною, тобто такою, за допомогою якої можна імітувати різні її стани залежно від зміни стану її окремих параметрів, елементів, блоків, зв'язків (внутрішніх чи зовнішніх), а також умов зовнішнього середовища.

Прогнозування екологічне – це вичування можливих змін стану або поведінки (впливу) системи, які викликані антропогенною діяльністю чи природними процесами.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ АТМОСФЕРИ

ТЕМА 4 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ АТМОСФЕРИ

4.1 Загальні положення

Визначимося в основних термінах.

Атмосфера – зовнішня газова оболонка Землі, яка обертається разом з нею.

Повітря – газовий склад атмосфери Землі.

Зовнішнє середовище – сукупність зовнішніх умов, які діють, впливають на систему і викликають у ній відповідні зміни.

Забруднення атмосфери – внесення в неї хімічних речовин, фізичних агентів або організмів, які несприятливо впливають на її якість.

Рівень забруднення – частина атмосфери, в якій при надходженні забруднюючих речовин порушується природний вміст елементів або біохімічні чи біологічні процеси, а концентрація домішки перевищує природну.

Домішок (забруднююча речовина) – речовина, яка порушує природну якість повітря.

Пасивний домішок – це така забруднююча речовина, яка аж до випадання її з повітря на землю не зазнає змін (тобто не вступає в хімічні реакції).

Джерело забруднення атмосфери – це об'єкт, який вносить в атмосферу домішки (забруднюючі речовини).

Фактор – причина, яка знаходиться в певному логічному зв'язку з наслідком.

Якість повітря – ступінь відповідності повітря фізико-хімічним та біологічним характеристикам потреб людини і технічним вимогам.

Небезпека забруднення – ступінь вірогідності перебільшення природного або гігієнічно допустимого рівня вмісту шкідливих речовин у повітрі.

Екологічна небезпека – реальна загроза виникнення несприятливих для людини (або живих організмів) наслідків у результаті впливу факторів з боку атмосфери.

Екологічна проблема – будь-яке явище, пов'язане з помітним впливом людини на повітря (атмосферу) або зворотним впливом атмосфери (повітря) на людину безпосередньо або на її економіку.

Проблемна ситуація – антропогенні зміни атмосфери, які викликають негативні екологічні, економічні чи соціальні наслідки.

Конфліктна ситуація – локальне або регіональне погіршення стану атмосферного повітря, яке оцінюється як суспільно небезпечне або невиправдане.

У таблиці 4.1 наведено склад основних речовин природного незабрудненого повітря.

У таблиці 4.2 вказані найбільш розновсюджені забруднювачі атмосфери та основні джерела їх викиду.

Таблиця 4.1 - Склад незабрудненого повітря атмосфери

Газ		Відношення суміші за об'ємом
Найменування	Позначення	
Азот	N_2	0,781
Кисень	O_2	0,209
Аргон	$40 A_2$	$9,34 \cdot 10^{-2}$
Вода	H_2O	$4,0 \cdot 10^{-2}$
Окисля вуглецю	CO_2	$(2 - 4) \cdot 10^{-4}$
Неон	Ne	$1,82 \cdot 10^{-5}$
Гелій	4 He	$5,24 \cdot 10^{-6}$
Вуглеводень	CH_4	$(1 - 2) \cdot 10^{-6}$
Криптон	K_2	$1,14 \cdot 10^{-6}$
Вуглець	H_2	$(4 - 10) \cdot 10^{-7}$
Окисли азоту	N_2O_x	$(6 - 8) \cdot 10^{-7}$
Озон	O_3	$5 \cdot 10^{-8}$
Інші речовини	-	

Таблиця 4.2 - Основні забруднювачі атмосфери та їх джерела

Забруднювач	Джерело викиду
1	2
Двоокис сірки	Спалювання вугілля, виробництво сірчаної кислоти і нафтопродуктів, ливарне виробництво, нафтоочищення
Окис вуглецю	Спалювання рідкого палива, вугільні шахти, доменні печі, викиди двигунів внутрішнього згорання
Окисли азоту	Виробництво вибухових речовин, кислот та мінералів, викиди двигунів внутрішнього згорання

Продовження таблиці 4.2

1	2
Сірководень	Виробництво віскози, нафтопереробка та перегонка нафти, виробництво шкіряної сировини, обробка стічних вод
Озон	Фотоактивація
Сірчана кислота	Виробництва, пов'язані з каталітичною дією окислів азоту
Сажа	Спалювання вугілля та інших паливних речовин, очищення нафти, шахти, кар'єри, електростанції, виробництво кераміки, відпрацьовані гази заводів та фабрик
Реактивні гази	Ядерні випробування, пал'єне для реакторів, стоки ядерних реакторів
Нециклічні з'єднання перекисів та альдегіди, метил та диметил сульфід	Фотохімічні реакції, реакції озону, промислові викиди двигунів внутрішнього згорання, паперова промисловість

4.2 Джерела забруднення атмосфери

Всі джерела, які забруднюють атмосферу, можна розподілити за видами: стаціонарні і нестаціонарні, а також організовані і неорганізовані.

Найбільше забруднюють атмосферу стаціонарні організовані джерела. Можна відмітити наступні їх типи (рис. 4.1):

- 1 Одиночне (точкове) джерело з круглим отвором (труба).
- 2 Багатостовбурове джерело, яке складається з кількох стовбурів (тобто труба, розподілена вертикально на сектори).

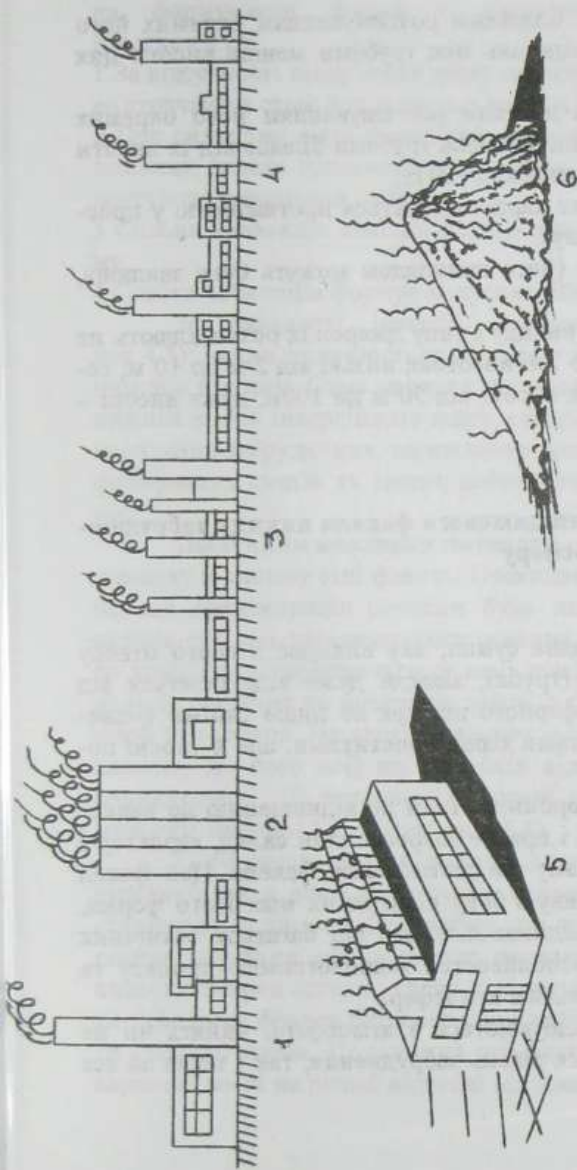


Рисунок 4.1 – Ілюстрація тнів стаціонарних джерел забруднення атмосфери

3 Групове джерело з близьким розташуванням окремих його джерел (тобто коли відстань між трубами менше висоти цих труб).

4 Групове джерело з далеким розташуванням його окремих джерел (тобто коли відстань між трубами більше від їх висоти (H), але менша ніж величина $x=10 \cdot H$).

5 Лінійне джерело, яке характеризується протяжністю у просторі в довжину (ширину).

6 Площинне джерело (його прикладом можуть бути звалища, смітники, терикони).

Незалежно від викиду і типу джерел їх розподіляють на такі класи: на землі до 2 м висотою; низькі від 2 м до 10 м; середні від 10 м до 50 м; високі від 50 м до 100 м; дуже високі – вище 100 м висотою.

4.3 Формування димового факела викиду забруднюючих речовин в атмосфері

Пилогазоповітряна суміш, яку викидає з свого отвору стаціонарне джерело (труба), завжди дуже відрізняється від навколишнього атмосферного повітря не лише своїми фізичними, хімічними і іншими характеристиками, але й своєю поведінкою.

Цей викид є стороннім тілом по відношенню до навколишнього середовища і прагне зберегти свій склад, характер і форму якнайдовше. Тому він дістав назву факела. Цей факел зазнає постійного впливу з боку повітряних мас. Його форма, напрямок руху та поведінка залежать від багатьох технічних параметрів джерела, особливостей технологічного процесу та процесів, які відбуваються в атмосфері.

Процеси, які відбуваються в атмосфері, чинять чи не найбільший вплив як на рівень забруднення, так і перш за все

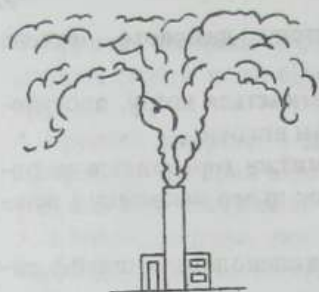
на формування форми і характеру димового факела (рисунок 4.2):

- 1 За відсутності вітру стовп диму піднімається вгору, поступово втрачаючи свою потужність з ростом висоти.
- 2 При сильному вітрі факел займає майже горизонтальне положення, далеко простягаючись вздовж цього напрямку і дуже поступово втрачаючи силу.
- 3 Сильна конвекція повітря формує хвилеподібний шлейф диму.
- 4 Слабка конвенція формує конусоподібний факел.

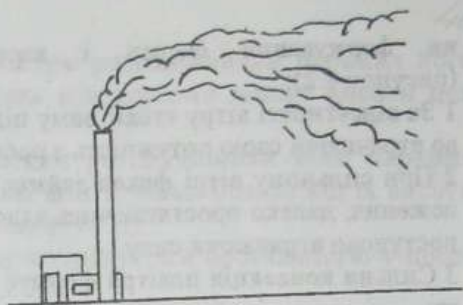
За наявності інверсії можливі три випадки (рисунок 4.3): викид здійснюється в самому інверсійному шарі, над ним або під ним. Саме випадок, коли джерело знаходиться під нижнім краєм інверсійного шару, створює умови для підвищеного рівня забруднення, задимлення приземного шару повітря, формування смогів та інших небезпечних екологічних ситуацій.

Наступним важливим питанням є розподіл концентрації домішки в самому тілі факела. Очевидно, слід чекати, що найбільша концентрація речовин буде поблизу його осі. Саме вздовж цієї осі переміщується основна маса речовин. Ближче до країв вона зменшується, а самі домішки мають тенденцію одні до осідання на поверхню землі, а інші до підйому в вищі шари атмосфери. На вертикальному зрізі факела (перпендикулярному до його осі) на будь-якій відстані (x) від джерела, концентрація (C) речовини в факелі розподіляється за нормальним законом Гауса (рисунок 4.4).

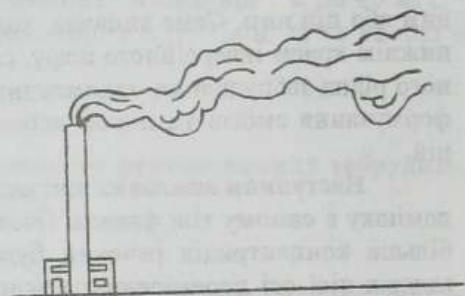
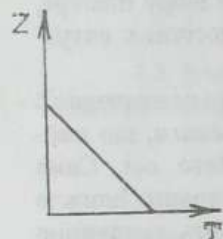
Пере лічені форми факелів далеко не вичерпують все різноманіття, а лише ілюструють основні характерні види для стаціонарних джерел. Нагадаємо, що дальність переміщення і розповсюдження забруднюючих речовин сягає десятків, а для високих джерел сотень і тисяч кілометрів. Доцільно простежити поведінку факела безпосередньо поблизу його виходу з гирла (отвору) труби. Положення осі факелу за висотою над поверхнею землі на різній відстані від джерела залежить перш за



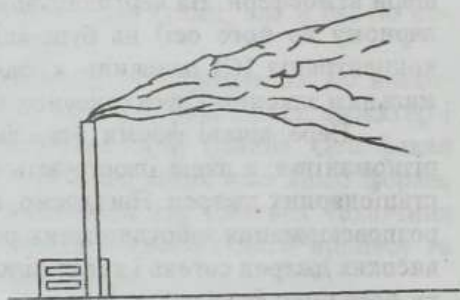
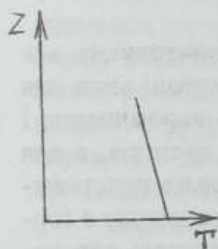
1



2



3



4

Рисунок 4.2 – Форми димових факелів

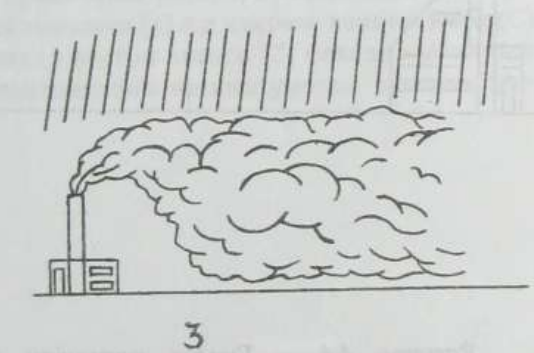
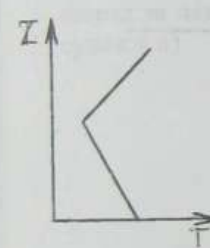
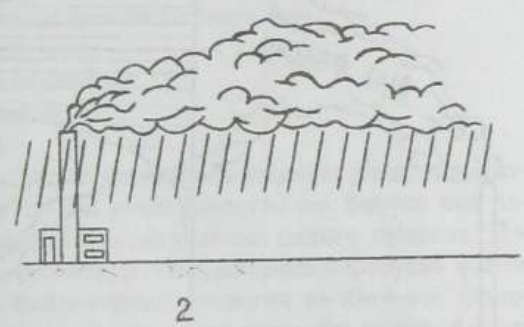
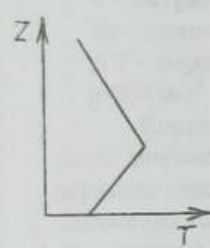
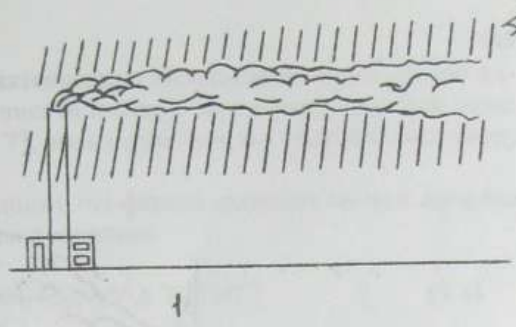
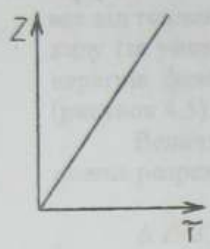


Рисунок 4.3 – Форми факелів за наявності інверсії

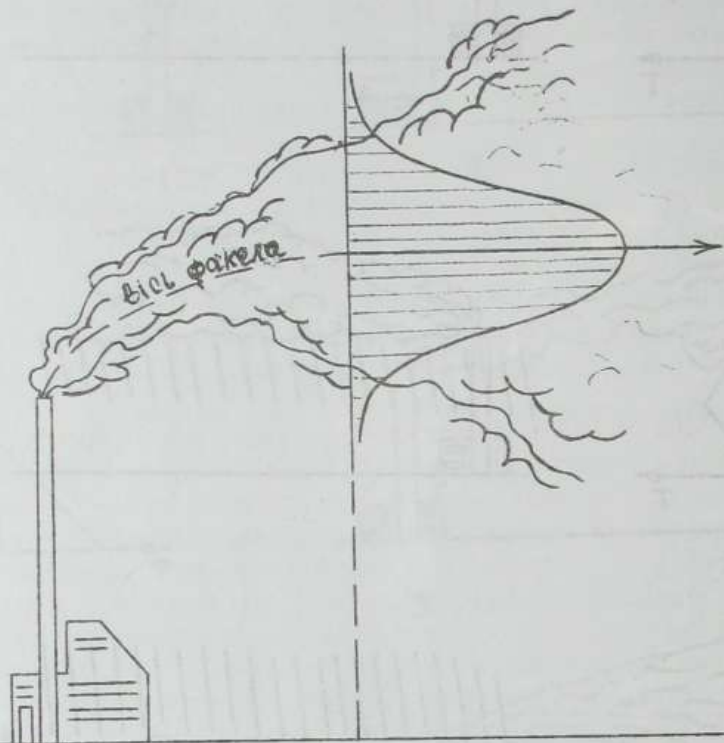


Рисунок 4.4 – Графік розподілу концентрації домішок всередині тіла факела

все від теплової характеристики пилгазоповітряної суміші викиду (за умови, що висота джерела не змінюється). Чим вище перегрів факела (ΔT), тим стрімкіше він підіймається вгору (рисунок 4.5).

Величину підйому осі факела відносно висоти джерела можна розрахувати за формулою

$$\Delta Z = 3,75 \cdot R \cdot W / U + 1,6 \cdot g \cdot V \cdot \Delta T / (TaU^3), \quad (4.1)$$

де R – радіус гирла (отвору) труби, м;

U – швидкість вітру, м/с;

W – швидкість виходу факела з отвору, м/с;

V – витрати суміші, м³/с;

Ta – температура атмосфери, °С;

ΔT – перегрів факела, °С;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – const.

Корисно розглянути питання залежності рівня концентрації домішки в повітрі від рівня (висоти) осі факела над поверхнею землі та на різних відстанях від даного джерела. Дослідження свідчать, що чим далі від джерела перебуває факел, тем менший рівень концентрації речовини на його осі. Одночасно, чим вище над поверхнею землі знаходиться вісь факела на даній відстані від джерела, то концентрація домішки в факелі змінюється не прямо пропорційно, а за складним законом. До того ж, на різних відстанях (x) від джерела концентрація (C) домішки на осі факела з ростом висоти (Z) факела змінюється щораз за певним, притаманним певним умовам законом (рисунок 4.6).

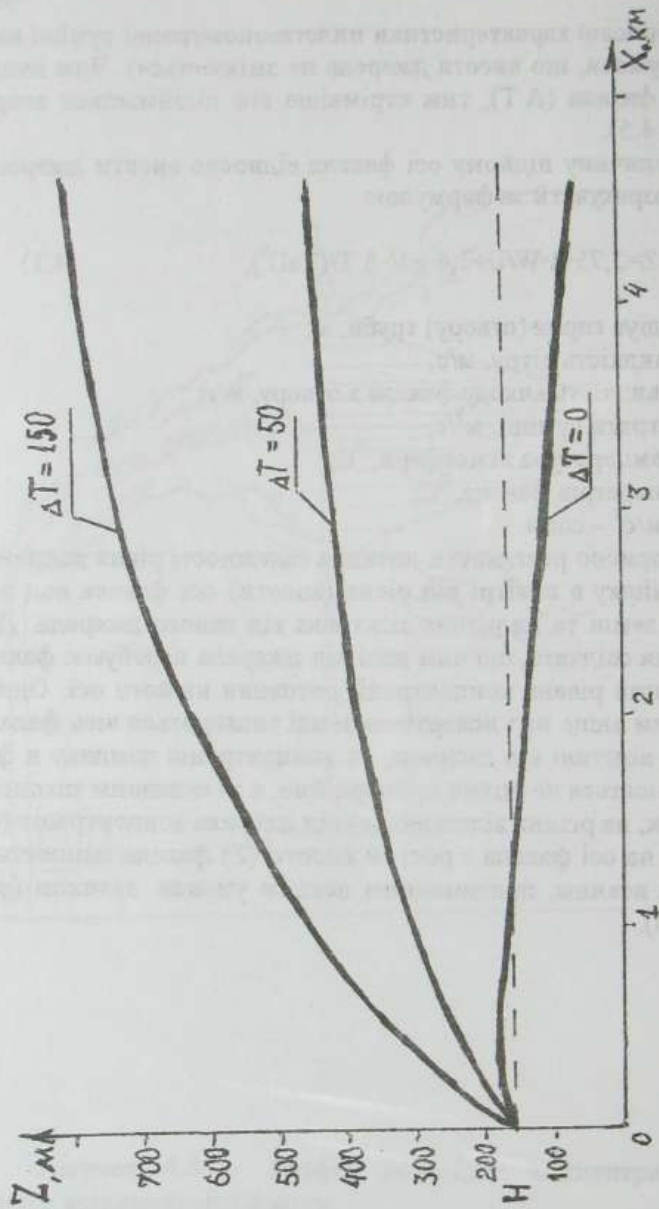


Рисунок 4.5 – Положення осі факела над поверхнею землі (Z) на різній відстані (X) від джерела залежно від перегріву (ΔT) факела

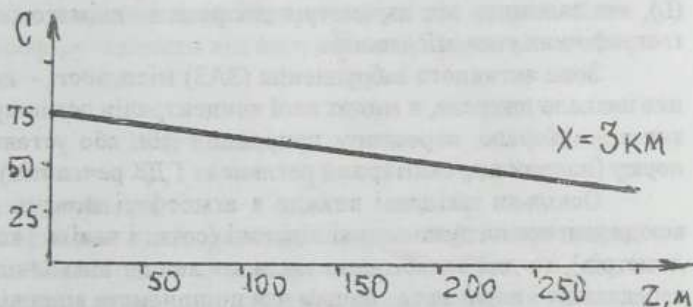
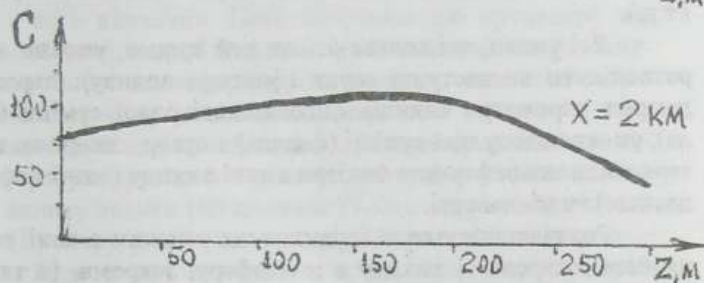
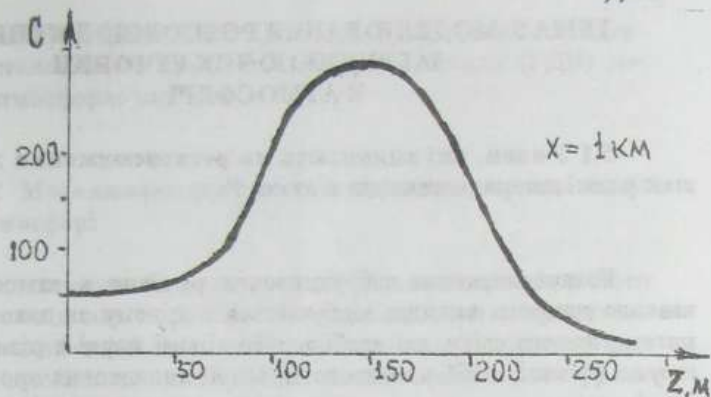


Рисунок 4.6 – Залежність концентрації (C) від висоти (Z) над землею на різній відстані (X) від джерела

ТЕМА 5 МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРІ

5.1 Умови, які впливають на розповсюдження домішок у зоні джерела викидів в атмосфері

Розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері навколо джерела викидів відбувається в цілому за законами математичного світу, які здебільшого відомі науці в різних її галузях (фізиці, хімії, кліматології, теорії випадкових процесів і т.д.).

Усі умови, які впливають на цей процес, умовно можна розподілити на наступні групи (фактори впливу): параметри джерел, параметри викидів пиліагазоповітряної суміші (факела); умови виходу цієї суміші (факела) з отвору джерела; характеристики атмосферного повітря в зоні викиду (зовнішнє середовище) та місцевості.

Розповсюдження забруднюючих речовин в зоні стаціонарного джерела їх викиду в атмосферу, зокрема, (а також і будь-якого іншого) характеризується перш за все дальністю (L), яка залежить від параметрів джерела і клімато-геолого-географічних умов місцевості.

Зона активного забруднення (ЗАЗ) місцевості – це ділянка навколо джерела, в межах якої концентрація домішки, який викидає джерело, перевищує природний фон або установлену норму (наприклад санітарний регламент ГДК речовини).

Оскільки шкідливі викиди в атмосфері можуть розповсюджуватися на дуже великі відстані (сотні і навіть тисячі кілометрів), то для запобігання завданню шкоди навколишньому середовищу і перш за все людям для підприємств відповідно до законодавства встановлюють санітарно-захисні зони (СЗЗ) залежно від їх потужності, характеристик технологічного процесу, характеристик та кількості забруднюючих речовин, випро-

мінення, шуму, вібрацій і т.д. Крім цього, для кожного підприємства встановлюють гранично допустимі викиди (ГДВ) домішок в атмосферне повітря.

5.2 Моделювання дальності розповсюдження домішок в атмосфері

Моделювання будь-якого процесу звичайно відбувається послідовно від найбільш простого до найбільш досконалого варіанта, який найбільш адекватно і точно відображає цей процес відповідно до рівня наших знань і можливостей на даному етапі його вивчення. Проілюструємо цю процедуру на поетапній побудові моделі дальності розповсюдження речовин в приземному шарі атмосфери в зоні викидів точкового (одинокого) стаціонарно організованого джерела.

І етап. Найбільш проста модель розповсюдження в повітрі атмосфери конкретного окремого забруднювача зводиться до обліку впливу висоти (Н) джерела (тобто окремої труби) на дальність (L) забруднення повітря цією домішкою. Звичайно, така оцінка буде досить приблизна, проте і використовують її для відносно грубих припущень у першому наближенні.

Дальність розповсюдження речовини від джерела її викиду в атмосферу залежно від його висоти (Н) можна оцінити за виразом

$$L(H) = K_n \cdot H, \quad (5.1)$$

де Н – висота труби, м;

K_n – коефіцієнт, який враховує агрегатний стан речовини (для газів $K_n = 120$, для твердих речовин $K_n = 90$).

Звичайно, вплив агрегатного стану враховується досить приблизно згідно з емпіричними дослідними даними. Проте на даному етапі це дозволяє здійснити оцінку дальності зони забруднення з досить задовільним наближенням. Попри все ця

модель дозволяє досліджувати вплив висоти джерела викиду на розповсюдження забруднення в атмосфері при невідомих інших умовах.

Розглянемо графіки впливу висоти джерела на характер забруднення атмосфери (рисунок 5.1).

При певній висоті джерела (H_1) рівень забруднення приземного шару повітря починає зростати досить стрімко, починаючи з точки (x_{01}), і на відстані (x_{m1}) від джерела концентрація речовини досягає максимального значення (C_{m1}). З віддаленням вона починає відносно плавно зменшуватись, наближаючись до фону. Якщо позначити рівень регламенту (наприклад, санітарну норму гранично допустимої концентрації (ГДК) цієї речовини), то у даному випадку забруднена зона обмежується інтервалом між точками (x_{11}) та (x_{12}). У цій зоні концентрація даної речовини перевищує санітарну норму. Зазначимо, що звичайно на відрізьку ($O - x_{01}$), тобто від джерела до точки (x_{01}) наростання забруднення, насправді теж спостерігається деякий рівень забруднення. Він утворюється, по-перше, низькими викидами не з труби, а іншими виробничими процесами (наприклад, вентиляційні викиди, викиди при перевантаженні сировини і т.п.). А по-друге, найбільш важкі фракції викидів також опускаються зразу ж поблизу труби. Але оскільки ми розглядаємо у даному випадку процес розповсюдження домішок в атмосфері суто теоретично, то графік рівня забруднення атмосфери має саме вказаний вигляд.

Розглянемо тепер, що зміниться, якщо висоту труби змінити, наприклад, на величину (ΔH), тобто до висоти (H_2). Отже, нехай $H_2 > H_1$. Тоді у такому випадку відстань (x_{02}), починаючи з якої буде наростати забруднення, збільшиться, а саме $x_{02} > x_{01}$.

Зміниться і сам характер наростання забруднення на ділянці від (x_{02}) до (x_{m2}). Концентрація зростає не так стрімко, як у попередньому варіанті при (H_1), а більш плавно, повільніше. Та й максимальний рівень забруднення (C_{m2}) буде відчутно нижчий ($C_{m2} < C_{m1}$). Крім того, місце (x_{m2}), де спостерігається

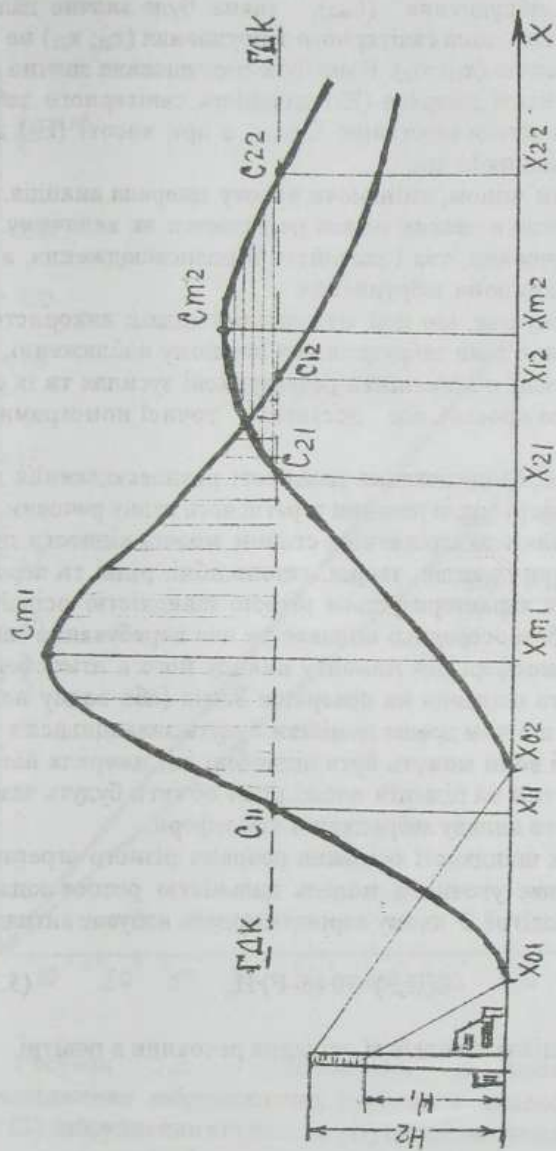


Рисунок 5.1 – Вплив висоти джерела на характер забруднення

максимум забруднення (C_{m2}), також буде значно далше, ($x_{m2} > x_{m1}$). Отже, зона санітарного забруднення ($x_{21}; x_{22}$) не буде збігатися з зоною ($x_{11}; x_{12}$). Вона буде розташована значно далі. Тобто при висоті джерела (H_1) дальність санітарного забруднення обмежується відстанню $L_1=x_{12}$, а при висоті (H_2) дальність забруднення $L_2=x_{22}$.

Таким чином, змінюючи висоту джерела викидів в атмосферу можна в деяких межах регулювати як величину концентрації речовини, так і дальність її розповсюдження, а значить і величину зони забруднення.

Враховуючи, що цей методичний підхід використовується для оцінок зони забруднення у першому наближенні, буде цілком доцільним полегшити розрахункові зусилля та їх об'єм за допомогою простої, але достатньо точної номограми (рисунк 5.2).

II етап. Моделювання дальності розповсюдження домішок в атмосфері з урахуванням агрегатного стану речовин.

Речовини за агрегатним станом можна віднести до одного з наступних видів: тверді, газоподібні, рідкі та аерозолі. Кожен з них характеризується різною швидкістю осідання в повітрі. Це безпосередньо впливає на час перебування забруднювача в атмосфері від моменту викиду його в атмосферу до моменту його осідання на поверхню Землі (або водну поверхню). Звісно, що чим довше домішки будуть знаходитися в повітрі, тим далі вони можуть бути віднесені від джерела його викиду. Тобто тим на більшій площі різні об'єкти будуть зазнавати шкідливого впливу забрудненої атмосфери.

Облік швидкості осідання речовин різного агрегатного стану дозволяє уточнити модель дальністю розповсюдження домішок у повітрі. У цьому варіанті модель набуває вигляду

$$L(H,F)=30 \cdot (5-F) \cdot H, \quad (5.2)$$

де F – коефіцієнт швидкості осідання речовини в повітрі.

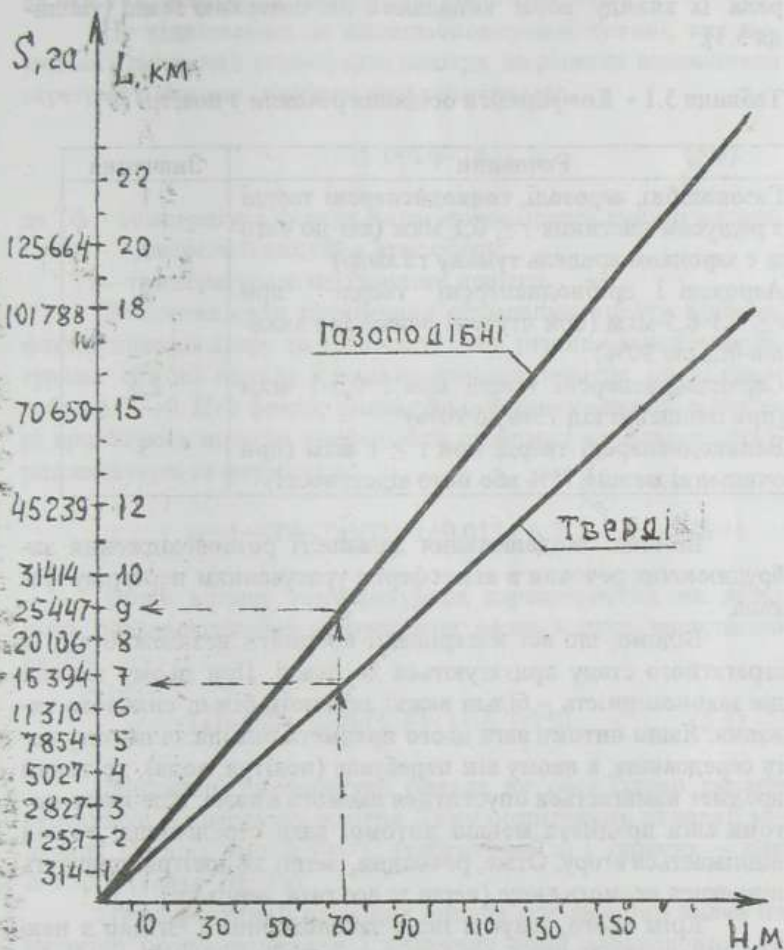


Рисунок 5.2 - Залежність дальності (L) розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері та площі (S) забруднення від висоти (H) джерела викидів

Зрозуміло, що чим більші і важчі часточки речовини, тим більша швидкість їх осідання, а отже, тим ближче до джерела їх викиду вони випадають на поверхню землі (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 - Коефіцієнти осідання речовин у повітрі (F)

Речовини	Значення
Газоподібні, аерозолі, тонкодисперсні тверді з радіусом частинок $r \leq 0,1$ мкм (які до того ж є зародком крапель туману та хмар)	1
Аерозолі і дрібнодисперсні тверді при $r \leq 0,1-0,5$ мкм (при ступені очищення викидів більше 90%)	2
Середньодисперсні тверді при $r=0,5-1$ мкм (при очищенні від 75% до 90%)	2,5
Великодисперсні тверді при $r \geq 1$ мкм (при очищенні менше 75% або його відсутності)	3

III етап. Моделювання дальності розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері з урахуванням перегріву факела.

Відомо, що всі матеріальні предмети незалежно від їх агрегатного стану притягуються до Землі. При цьому завжди діє закономірність – більш важкі зазнають більш сильного тяжіння. Якщо питома вага цього предмета більша за питому вагу середовища, в якому він перебуває (повітря, вода), то такий предмет намагається опуститися якомога нижче. Але якщо питома вага предмета менша питомої ваги середовища, то він піднімається вгору. Отже, речовини, легші за повітря, прагнуть піднятися якомога вище (перш за все гази, аерозолі).

Крім цього, існує й інша закономірність. Згідно з нею більш нагріті об'єкти (гази, предмети, зони повітря) по відношенню до навколишнього середовища також намагаються піднятися вгору (хоч до того часу, поки їх температури не зрівня-

ються). Сила цього устремління тим більша, чим більша різниця між температурами середовища і цього об'єкта.

По відношенню до пилгазоповітряної суміші, яку викидають джерела в атмосферне повітря, ця різниця називається перегрівом факела і вимірюється величиною

$$\Delta T = T_{\text{ф}} - T_{\text{а}}, \quad (5.3)$$

де $T_{\text{ф}}$ – температура факела пилгазоповітряної суміші в гирлі джерела її викиду в атмосферу;

$T_{\text{а}}$ – температура атмосферного повітря.

Величина сили піднімання обумовлює висоту підйому факела викидів вгору до того часу, поки різниця між температурами суміші викиду і навколишнього повітря не зникне, тобто $\Delta T \rightarrow 0$. Цей фактор впливу на поведінку викидів в повітрі враховують шляхом коефіцієнта підйому (φ) факела, який розраховують за формулою

$$\varphi = 1 + |(T_{\text{ф}} - T_{\text{а}}) / 75| \approx 1 + 0,0133 \cdot \Delta T. \quad (5.4)$$

Облік впливу температурних характеристик на дальність розповсюдження забруднення надає моделі наступного виразу:

$$L(H, F, T) = 30 \cdot H \cdot (5 - F) \cdot (1 + |\Delta T / 75|). \quad (5.5)$$

Звичайно, температура факела не обов'язково завжди перевищує температуру повітря. Тому розрізняють випадки холодних викидів при $\Delta T \approx 0^\circ\text{C}$ (тобто $T_{\text{ф}} \approx T_{\text{а}}$) і гарячих – при $\Delta T > 0^\circ\text{C}$ (тобто $T_{\text{ф}} > T_{\text{а}}$).

Температурний показник викиду має значний вплив на характер розповсюдження і величину зони забруднення. Ці особливості для холодного і гарячого викидів проілюстровано (за умови відсутності інших впливів) на рисунку 5.3.

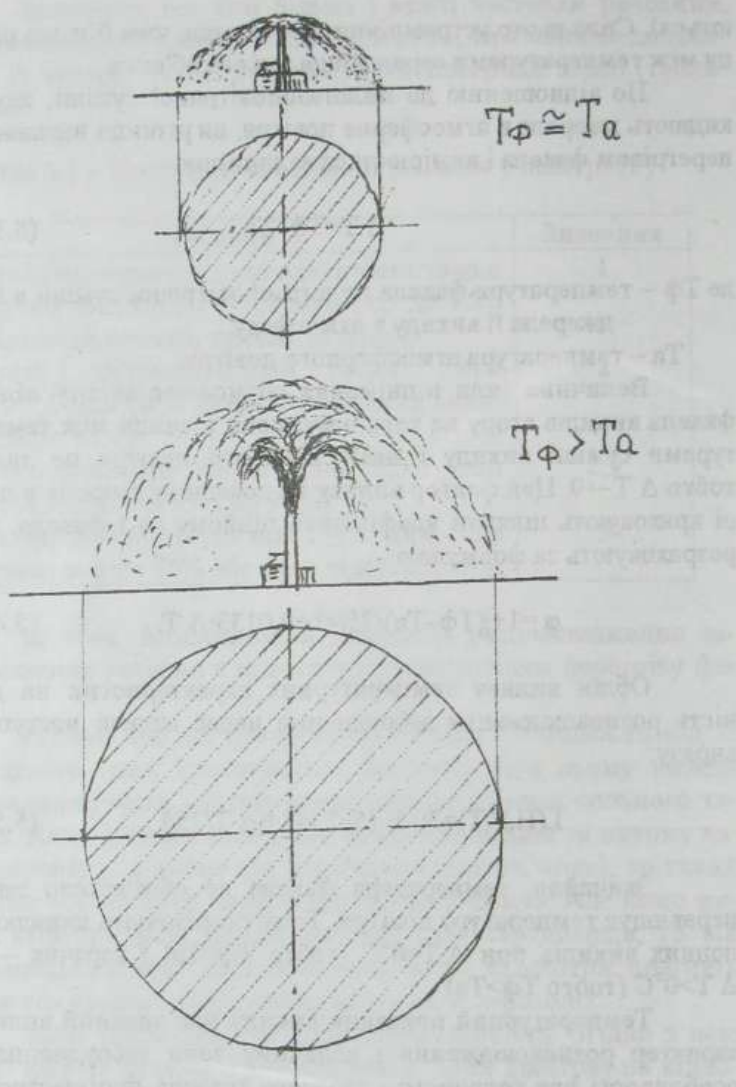


Рисунок 5.3 – Особливості розповсюдження домішок у повітрі залежно від перегріву факела

Дуже зручно у даному випадку користуватися номограмою (рисунок 5.4). З її допомогою можна швидко і достатньо точно визначити показник (ϕ) підйому факела (на горизонтальній осі верхня шкала), дальністю розповсюдження забруднення (L) навколо джерела викиду (на вертикальній осі права шкала), площу (S) зони забруднення (на вертикальній осі ліва шкала). Дані наведені для джерела, яке має висоту ($H=10$ м). Хід визначення ϕ , L , S показаний стрілкою для прикладу при $\Delta T=320^\circ\text{C}$ ($H=10$ м; $L=1052$ м; $S=349$ га). Але якщо висота джерела відрізняється від $H=10$, то для визначення ϕ , L , S досить ці показники, знайдені при заданому перегріві (ΔT) за номограмою, помножити на коефіцієнт зведення $K=0,1 \cdot H_{\text{факт}}$. Наприклад, для заданої висоти $H_{\text{факт}}=25$ м і $\Delta T=320^\circ\text{C}$ одержуємо: $L=2,5 \cdot 1052=2630$ м; $S=2,5 \cdot 349=2200$ га.

IV етап. Моделювання дальності розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері з урахуванням місцевих метеокліматичних умов.

Очевидно, що не лише температура повітря, а й напрямок і сила вітру впливають на характер та дальність розповсюдження забруднюючих речовин. Оскільки в різних напрямках вітер дме, як правило, неоднаковий час, до того ж з різною силою протягом року, тому домішки від джерела розповсюджуються теж на різні відстані у різних напрямках. Колоподібна зона забруднення може спостерігатися лише при штилі, при круговій розі вітрів (тобто повторюваність вітру в усіх напрямках однакова ($P_0=12,5\%$) протягом року) або при дуже малій швидкості вітру ($<0,5$ м/с).

Напрямок вітру обраховують за допомогою рози вітрів (у нас набула поширення восьмирумбова, яка характеризує 8 напрямків: північ (Пн), північний схід (ПнС), схід (С), південний схід (ПдС), південь (Пд), південний захід (ПдЗ), захід (З), північний захід (ПнЗ), а також штиль).

Румб – це середня повторюваність (P) вітру у даному напрямку (% або доля одиниці) за певний проміжок часу (середньорічна, за сезон, літо, зиму, добу і т.п.).

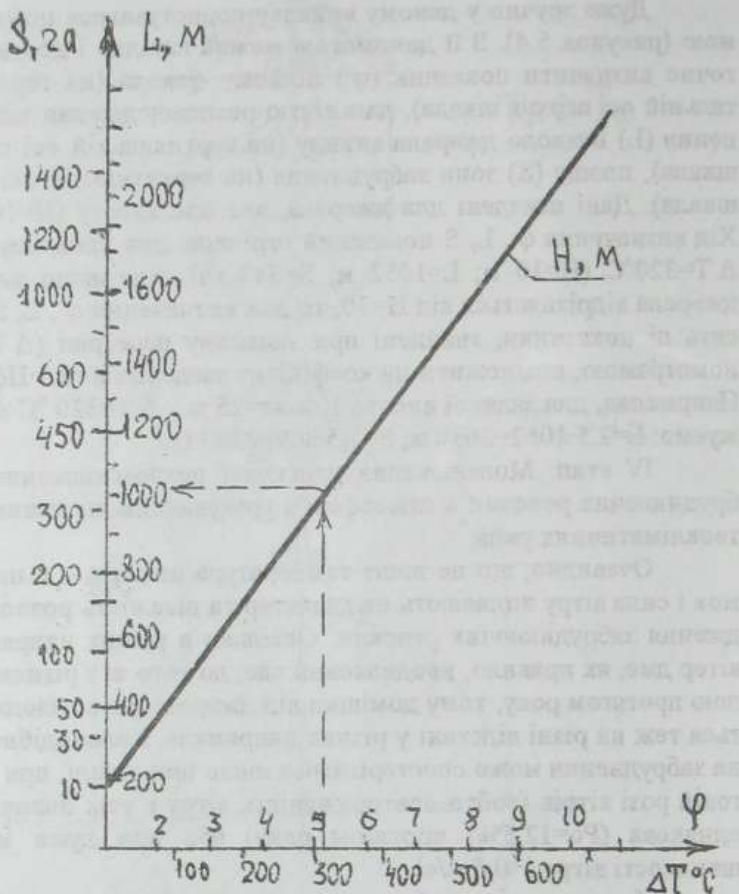


Рисунок 5.4 – Номограма для визначення φ , L , S за величиною ΔT (при $H = 10 \text{ м}$)

З урахуванням рози вітрів уточнена модель дальності розповсюдження забруднення в зоні викидів в атмосферу точкового стаціонарного джерела набуває вигляду

$$L(H, F, T, P) = 30 \cdot H \cdot (5 - F) \cdot (1 + \Delta T / 75) \cdot P_i / P_0, \quad (5.6)$$

де P_i – повторюваність вітру в i -му напрямку;

P_0 – повторюваність вітру при круговій розі вітрів ($P_0 = 0,125$).

Отже, різна повторюваність вітру в різних напрямках обумовлює різну дальність розповсюдження забруднюючих речовин від джерела їх викиду і відповідно впливає на особливості форми зони забруднення.

Підсумовуючи, підкреслимо, що розглянута процедура поетапної побудови моделі розповсюдження забруднюючих речовин у приземному шарі повітря в зоні джерела їх викидів являє собою функцію кількох змінних:

$$L = f(H, F, \Delta T, P), \quad (5.7)$$

де H – висота джерела викиду;

F – характеристика осідання речовини в повітрі;

ΔT – характеристика температури факелу по відношенню до атмосферного повітря;

P – повторюваність вітру в заданому напрямку.

ТЕМА 6 МОДЕЛЮВАННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

6.1 Загальні положення

Концентрація забруднюючих речовин у зоні викидів в атмосферне повітря формується під впливом багатьох факторів. Результати наукових досліджень дозволяють стверджувати,

що формування величини рівня забруднення повітря даною речовиною в конкретній точці залежить перш за все від наступних факторів: географічного місця розміщення джерела викидів; рельєфу місцевості, де розташоване джерело; кліматичних умов; параметрів джерела викидів; параметрів пилгазоповітряної суміші факела викидів; технологічних умов виходу цієї суміші із гирла джерела (отвору труби); координат пункту відбору проби повітря по відношенню до джерела викидів (розрахункової точки, в якій досліджується забруднення повітря).

Перелічені фактори впливу на формування рівня забруднення атмосфери не вичерпують їх переліку. Та все ж не можна не задати ще один – фактор часу.

Всі без винятку явища в природі плинні у просторі і часі. Не виняток і досліджуваний процес. Поле концентрації домішок в атмосфері в зоні їх викиду зазнає безперервних змін під дією факторів впливу як у горизонтальному, так і в вертикальному напрямках.

Горизонтальна складова швидкості переміщення домішок обумовлюється головним чином швидкістю вітру.

Вертикальна швидкість переміщення в кожен момент часу визначається різницею між швидкістю вертикального потоку повітря і швидкістю осідання часток домішки.

Вектор цих швидкостей зумовлює траєкторію переміщення і форму поля забруднення та його рівень у кожній окремій точці простору.

Результати впливу цих показників можна проілюструвати на прикладі динаміки концентрації речовини під факелом на різних відстанях від джерела (рисунок 6.1).

Лінія (1) характеризує теоретичний розрахунковий графік зміни рівня концентрації домішок у повітрі під факелом. Крива (2) відображає фактичні заміри рівня забруднення повітря вздовж димового факела. Заштриховані зони між ними характеризують різницю між теоретичним і фактичним рівнями забруднення на різних відстанях від джерела викиду.

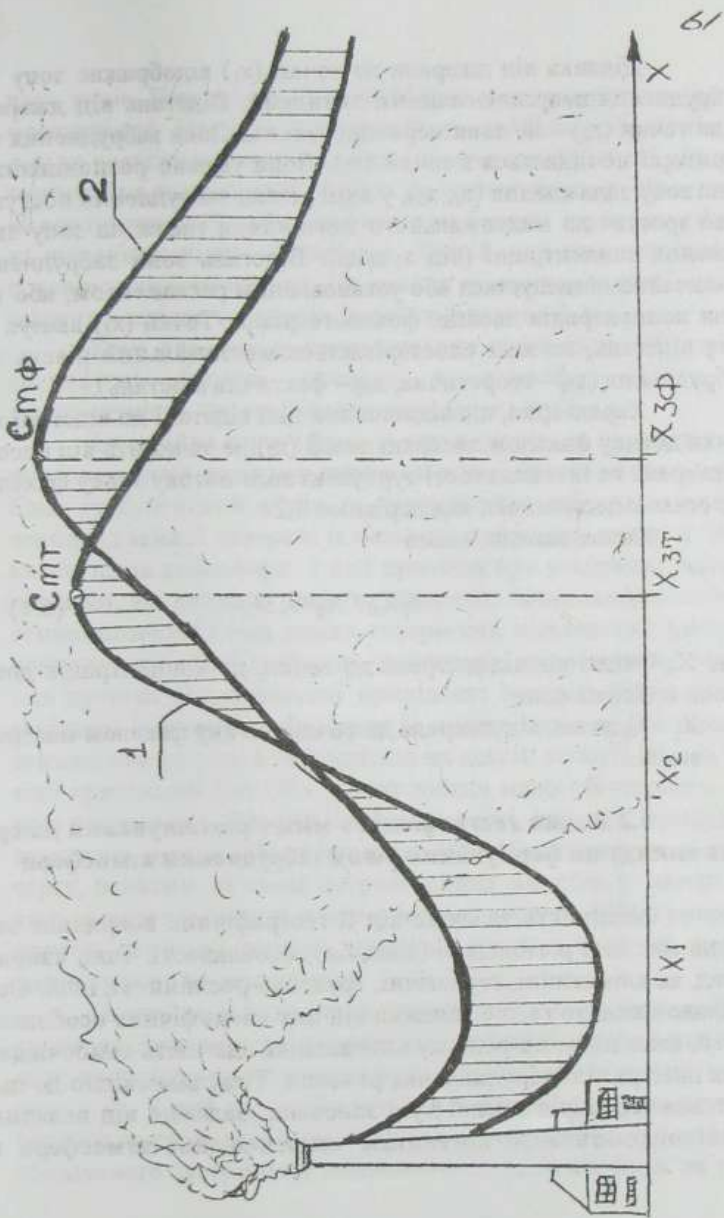


Рисунок 6.1 – Динаміка концентрації речовин у повітрі під факелом

Ділянка від джерела до точки (x_1) відображає зону забруднення неорганізованими викидами. Відстань від джерела до точки (x_2) – це зона перекиду факела. Зона забруднення території починається з точки (x_2). Вона умовно розподіляється на зону задимлення ($x_2; x_3$), у якій рівень забруднення поступово зростає до максимального значення, а також на зону зниження концентрації (від x_3 далі). Відстань зони забруднення звичайно обмежується або установленим регламентом, або коли концентрація досягає фоновому рівню. Точка (x_3) вказує на ту відстань, на якій спостерігається максимальний рівень забруднення ($x_{3т}$ – теоретична, $x_{3ф}$ – фактична відстань).

Характерно, що відношення цієї відстані до відстані точки дотику факелом поверхні землі (x_2) не залежить від висоти джерела та інтенсивності турбулентного потоку зносу факела і є сталою величиною, яка дорівнює 3,24.

Отже, завжди маємо

$$X_m / X_g = 3,24, \quad (6.1)$$

де X_m – відстань від джерела до точки, де концентрація домішок максимальна;

X_g – відстань від джерела до точки дотику факелом поверхні землі.

6.2 Вплив географічного місця розташування джерела викиду на формування рівня забруднення атмосфери

Місцевість залежно від її географічних координат завжди має свої регіональні (зональні) особливості. Такі, наприклад, як кліматичні, геологічні, ґрунтово-рослинні та інші. Особливо важливо те, що залежно від цих специфічних особливостей, вона може по-різному впливати на здатність самоочищення повітря від забруднюючих речовин. Тому відповідно до цього вся територія земної кулі зонована залежно від величини метеокліматичного потенціалу самоочищення атмосфери на

п'ять типів. Перший тип має найбільш низьку здатність до самоочищення. На нашій території це найбільш північна маленька частина території країни (північніше 52° п.ш.). Другий тип має більш помірну здатність до самоочищення. Практично це вся територія України за винятком I зони і південно-східної та південно-західної її частини. Третій тип має підвищений потенціал самоочищення. Це крайня південно-східна і крайня південно-західна територія України (рисунок 6.2).

Крім потенціалу самоочищення, місцевість обумовлює специфічні фізичні процеси в атмосфері (такі, як турбулентність, стратифікація, конвекція і т.п.).

Інверсійна стратифікація спостерігається у випадку, коли температура повітря в шарах на різній висоті сильно послаблює турбулентний обмін та переміщення забруднюючих речовин від земної поверхні із низького приземного шару в більш високі шари атмосфери. З цієї причини при утворенні інверсій домішки, які викидає наземне джерело, залишаються поблизу земної поверхні і тим самим створюють підвищений рівень їх концентрації в зоні їх викиду. Зазначимо, що в міських населених пунктах більш частіше припідняті інверсії (близько 46% загальної кількості, тобто коли їх нижня межа не збігається з землею поверхнею, а знаходиться на деякій висоті). Менш частіше приземлені (до 13%, у яких нижня межа збігається з землею поверхнею). Для сільської місцевості, навпаки, припідняті складають менше 15%, а приземні 38%. Це викликано, в першу чергу, великим об'ємом антропогенних викидів у містах. До того ж антропогенний потік у містах досягає 10% сумарного притоку сонячної радіації, теплоти в ґрунт та теплоти, яка витрачається на випаровування.

Звичайно в природних умовах вночі складаються більш сприятливі умови для формування приземної інверсії радіаційного проходження (вертикальний градієнт температури повітря $\gamma < 0$). У цей час відбувається особливо інтенсивна втрата теплоти землею поверхнею. Проте в цей же час під впливом збільшеного зустрічного випромінювання атмосфери за раху-

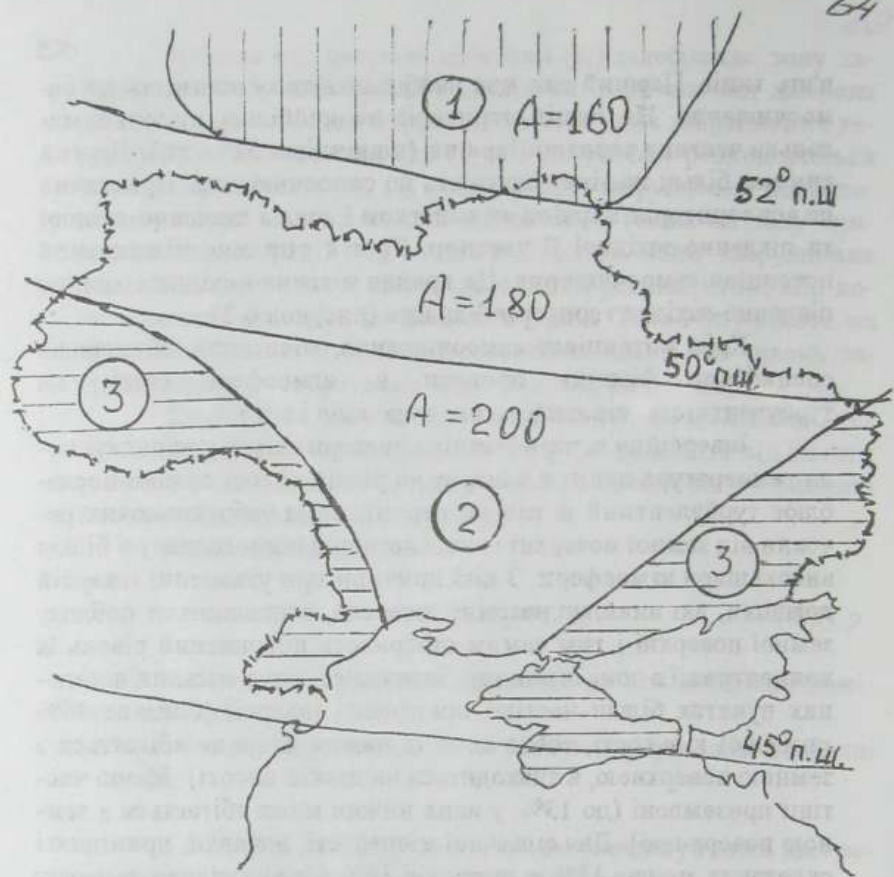


Рисунок 6.2 – Районування території України за потенціалом самоочищення атмосфери

нок наявності в ній високих концентрацій домішок та водяного пару в населених пунктах (великих містах) ефективно випромінювання поверхні землі значно нижче, ніж на околицях. Оскільки вночі в містах тепловий потік із землі за своєю абсолютною величиною значно більший, ніж на околицях, то вночі в містах поблизу поверхні більш позитивне значення вертикального градієнта температури ($\gamma > 0$).

Температура в приземному шарі не підвищується, як це має місце на околицях, а навпаки, знижується з висотою. Відповідно інверсія при цьому піднімається на деяку висоту (Z) над поверхнею землі (рисунок 6.3).

При розгляданні процесів стратифікації звичайно вважають, що приземний шар атмосфери обмежується висотою $Z=50-100$ м, а прикордонний досягає висоти 1000 м.

Концентрація забруднюючої речовини в приземному шарі атмосфери над сушею визначається швидкістю вітру і турбулентним обміном (для стаціонарних джерел і для речовини, яка зберігається тривалий час у повітрі). Однією з головних характеристик приземного шару є збереження в ньому по висоті вертикальних потоків тепла і кількості руху. Для нього із збільшенням висоти властива значна зміна швидкості вітру, температури, турбулентності, а також виявлення впливу сталості і тривкості атмосфери, який пов'язаний із температурною стратифікацією.

Вирізняють наступні умови стратифікації: байдужа (вертикальний потік тепла близький до нуля, а зміни температури повітря з висотою відбувається за адіабатичним законом, тобто мало змінюються); небайдужа (температурний градієнт істотно відрізняється від нуля); нестійкий стан (із зверхньо адіабатичним градієнтом температури, коли стратифікація сприяє розвитку випадкових збурень у повітряному потоці і посиленню турбулентного обміну); сталий стан (власне стратифікація, коли температура збільшується із висотою).

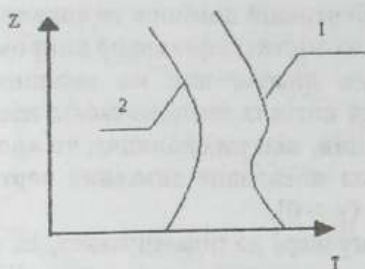


Рисунок 6.3 – Вертикальна (Z) зміна температури (T) повітря у місті (1) і на околицях (2)

Якщо в атмосфері має місце інверсія температури, то збурення в потоці згасають, і інтенсивність турбулентного обміну слабшає.

6.3 Ефект температури і стратифікації атмосфери

Наявність тих чи інших умов стратифікації атмосфери по різному впливає на формування поля забруднення (рисунки 6.4). Порівняно з характером забруднення даним джерелом викиду за відсутності стратифікації повітря стійка стратифікація віддаляє зону максимального забруднення (x_2) і в цілому зменшує абсолютний його рівень. Навпаки, нестійка стратифікація наближає цю зону (x_3) до джерела та збільшує в ній рівень концентрації забруднюючих речовин.

Ефект впливу температурної стратифікації атмосфери за несприятливих метеоумов (за яких концентрація речовин має максимальний рівень) обліковується спеціальним коефіцієнтом (A) при розрахунках рівня забруднення. На території України цей показник має такі значення: $A=160$ для території північніше 52° п.ш., $A=180$ для території від 52° до 50° п.ш. та $A=200$ південніше 50° п.ш. (рисунки 6.2).

6.4 Вплив метеокліматичних умов на забруднення атмосфери

Перш за все слід зазначити, що на рівень забруднення в будь-якій точці простору в зоні джерела викидів забруднюючих речовин безпосередньо впливають такі метеофактори, як швидкість і напрям вітру та температура повітря.

Температура атмосферного повітря (T_a) в розрахунках рівня концентрації домішок в заданій точці, яка дорівнює максимальній для найбільш жаркого місяця року (липень) за СН і ПУ або за даними гідрометеослужби для даної місцевості. Крім цього, вона може визначатися окремо для холодної і теплої пори року (коли середньодобова за період температура відповідно $T_x < 0^\circ\text{C}$ або $T_t > 0^\circ\text{C}$).

Різниця між температурою суміші (T_c) на виході з гирла джерела і температурою (T_a) зовнішнього повітря (перегрів факела) викликає деякий початковий підйом осі факела на висоту (ΔZ). Цей підйом спостерігається іноді на відстані в кілька кілометрів і досягає сотень метрів (рисунок 4.5). Цей фактор має значний вплив на точку дотику факелом поверхні землі і відповідно відстані, на якій формується найбільший рівень забруднення.

Швидкість вітру, а відтак його напрямок, також безпосередньо впливають на формування рівня забруднення в досліджуваній точці. Очевидно, що чим сильніший вітер, тим далі від джерела він переносить домішки в тому напрямку, куди він дме. Оскільки напрямок вітру постійно змінюється, то цей фактор впливу необхідно обов'язково враховувати при розробці моделі формування рівня забруднення в заданій точці простору. Відтак координати цієї точки також відіграють першосуттєве значення для розрахунку концентрації домішок в атмосфері.

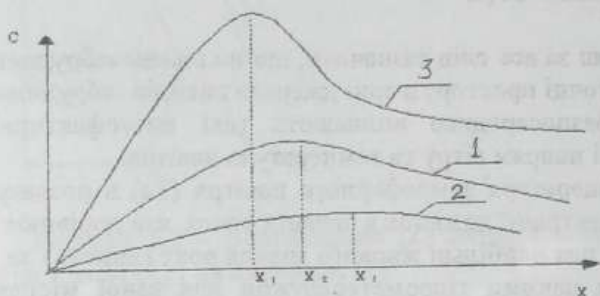


Рисунок 6.4 – Розподіл концентрації (C) речовин вздовж осі факела поблизу земної поверхні за відсутності (1), стійкої (2) і нестійкої (3) стратифікації атмосфери

Швидкість вітру (U , м/с) класифікують таким чином (на висоті 10 м над рівнем землі): штиль (0-0,5 м/с); слабкий (0,5-2 м/с); помірний (2-5 м/с); сильний (5-10 м/с); дуже сильний (понад 10 м/с).

При розрахунках забруднення повітря виділяють значення небезпечної швидкості (U_m) вітру, при якій рівень приземної концентрації домішки досягає максимальної величини (C_m).

Напрямок дії вітру враховується шляхом використання рози вітрів. У розрахунках забруднення атмосфери використовують різні її види: середньорічну розу вітрів, для холодного або теплого сезону, для необхідного розрахункового періоду і т.п.

6.5 Вплив параметрів джерела викидів на забруднення атмосфери

Само собою зрозуміло, що параметри джерела викидів домішок в атмосферу безпосередньо впливають на формування рівня і характеру забруднення. Перш за все, це такі: висота джерела над поверхнею землі (H); діаметр отвору труби в гирлі (D), тобто в місці виходу факела в атмосферу; маса викиду кожної окремої забруднюючої речовини (M); кількість домішок, які викидає це джерело в повітря (K). Всі ці дані для окремої труби звичайно відомі за технологічними нормативами.

Не забудьмо також координати джерела (географічні, на карті місцевості, на плані проммайндчика).

У випадку багатоствольної труби ефективний діаметр гирла джерела розраховують за формулою

$$D_{\text{еф}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \sum S_i}, \quad (6.2)$$

де S_i – площа отвору кожного окремого стовбура;

$$\pi = 3,14.$$

Для групового близько розташованого джерела ефективний діаметр гирла (за умови, що всі труби мають однакові розміри висоти і отворів) дорівнює

$$D_{\text{еф}} = D \sqrt{n}, \quad (6.3)$$

де D – діаметр отвору кожної з труб;

n – кількість труб.

Для лінійного джерела ефективний діаметр оцінюється виразом

$$D_{\text{еф}} = \frac{2LV}{V + WL^2}, \quad (6.4)$$

де L – довжина джерела, м;

V – витрати суміші, $\text{м}^3/\text{с}$;

W – швидкість виходу суміші з отвору, $\text{м}/\text{с}$.

В усіх цих випадках маса загального викиду окремої речовини обчислюється її сумою:

$$M_e = \sum_{i=1, n} \overline{M_i}, \quad (6.5)$$

де M_i – маса викиду даної речовини з кожного отвору

складного джерела (багатостовбурового, групового);

n – кількість труб.

Аналогічно визначається у цих випадках і об'єм пилогазовітряного викиду

$$V_e = \sum_{i=1, n} \overline{V_i}, \quad (6.6)$$

де V_i – витрати викиду окремою i -ю трубою, $\text{м}^3/\text{с}$.

Для групового близькорозташованого джерела, у якого параметри труби різні (H , D , $T\phi$), та для групового далекорозташованого джерела кожна з труб розглядається окремо сама по собі.

6.6 Вплив параметрів пилогазовітряної суміші викиду на забруднення атмосфери

На рівень концентрації речовини в досліджуваній (розрахунковій точці) простору перш за все впливають швидкість виходу суміші викиду з гирла труби (W , $\text{м}^3/\text{с}$) та його температура ($T\phi^\circ\text{C}$).

Швидкість виходу викиду задається технологічними показниками виробничого процесу. Витрати суміші (об'єм в одиницю часу) розраховується за формулою

$$V=0,25\pi WД^2, \quad (6.7)$$

де $Д$ – діаметр отвору труби;

W – швидкість виходу факела;

$\pi = 3,14$.

Звідси, якщо відомий об'єм викиду, то швидкість виходу факела дорівнює

$$W = \frac{4V}{\pi Д^2}. \quad (6.8)$$

Крім цих фізичних характеристик, для суміші викиду вводитья штучний розрахунковий показник:

$$f = 1000 \frac{ДW^2}{H^2 \Delta T} = 1621 \frac{V^2}{Y^2 Д^3 \Delta T}. \quad (6.9)$$

Усі викиди за своїми температурними показниками (Тф) по відношенню до зовнішнього атмосферного повітря (Та) розподіляються на холодні ($\Delta T=0$; $f \geq 100$) та гарячі ($\Delta T > 0$; $f < 100$).

Подальші параметри викиду розглядаються окремо для холодних і окремо для гарячих викидів.

Наступний розрахунковий параметр суміші має значення:

- для гарячого викиду

$$P_z = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V \cdot \Delta T}{H}}; \quad (6.10)$$

- для холодного викиду

$$P_x = 1,3 \frac{WД}{H} = 1,66 \frac{V}{HД}. \quad (6.11)$$

На його основі обчислюють загальний параметр викиду:

$$f_e = 800 P_x^3. \quad (6.12)$$

Розрахунковий параметр факела:

- для гарячих викидів

$$dz = 2,48 (1 + 0,28 \sqrt[3]{f_e}) \quad \text{для } Pr \leq 0,5,$$

$$dz = 4,95 Pr (1 + 0,28 \sqrt[3]{f_e}) \quad \text{для } 0,5 < Pr \leq 2, \quad (6.13)$$

$$dz = 7 \sqrt{Pr} (1 + 0,28 \sqrt[3]{f_e}) \quad \text{для } Pr > 2;$$

- для холодних викидів

$$d_x = 5,7 \quad \text{для } P \leq 0,5,$$

$$d_x = 11,4 \cdot P_x \quad \text{для } 0,5 < P \leq 2, \quad (6.14)$$

$$d_x = 16 \sqrt{P_x} \quad \text{для } P > 2.$$

6.7 Вплив параметрів виходу факела з отвору труби на забруднення атмосфери

На формування рівня забруднення суттєво впливають умови виходу факела пилогазоповітряної суміші із отвору труби. Вони різні для холодного і відповідно гарячого викидів.

Коефіцієнт обліку виходу:

- для гарячого викиду ($\Delta T > 0; f < 100$)

$$m_z = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}}; \quad (6.15)$$

- для холодного викиду ($\Delta T = 0; f \geq 100$)

$$m_x = \frac{1,47}{\sqrt[3]{f}}. \quad (6.16)$$

Параметр умов виходу:

- для гарячого викиду

$$\begin{aligned} p_r &= 1 && \text{для } P_r \geq 2, \\ p_r &= 4,4 \cdot P_r && \text{для } P_r < 0,5, \\ p_r &= 0,532 \cdot P_r^2 - 2,13 \cdot P_r + 3,13 && \text{для } 0,5 \leq P_r < 2; \end{aligned} \quad (6.17)$$

- для холодного викиду

$$\begin{aligned} p_x &= 1 && \text{для } P_x \geq 2, \\ p_x &= 4,4 \cdot P_x && \text{для } P_x < 0,5, \\ p_x &= 0,532 \cdot P_x^2 - 2,13 \cdot P_x + 3,13 && \text{для } 0,5 \leq P_x < 2. \end{aligned} \quad (6.18)$$

6.8 Вплив рельєфу місцевості на забруднення атмосфери

Рельєф місцевості і тип підстиляючої поверхні, безумовно, впливають на формування рівня забруднення. Про це красномовно свідчить той факт, що теоретичні і фактичні значення концентрації забруднюючої речовини мають меншу розбіжність для рівної плоскої місцевості і дуже відрізняються в умовах складного рельєфу і різнотиповості підстиляючої поверхні. На сьогодні розроблена методика лише впливу окремих елементів рельєфу місцевості на рівень максимальної приземної концентрації від одиночного точкового стаціонарного джерела викидів. Значення коефіцієнта (h) впливу рельєфу на забруднення атмосфери встановлюється на основі аналізу картографічного матеріалу місцевості в радіусі $50 \cdot H$ (де H – висота найбільш високого джерела викидів) або не менше ніж 2 км.

Якщо в околицях досліджуваного джерела викидів можна виділити окремо ізольовані перешкоди (гребінь, гряда, пасмо, бугор, уступ, балка, западина, яр), то значення коефіцієнта рельєфу розраховують за формулою

$$h=1+\varphi (h_r-1), \quad (6.19)$$

де φ – функція, яка характеризує перешкоду;

h_r – табличка величина.

Якщо позначити висоту (глибину) перешкоди (h_0) і ширину перешкоди ($2a_0$, де a_0 – половина ширини), а відстань від джерела до середини перешкоди (X_0), то при відомій висоті (H) джерела можна розрахувати відношення

$$n_1=H/h_0 \text{ і } n_2=a_0/h_0. \quad (6.20)$$

На основі (n_1) і (n_2) визначається (h_r) за таблицею 6.1.

Значення функції (φ) перешкоди можна визначити за графіком (рисунок 6.5) або розрахувати:

$$\varphi = |X_0|/a_0. \quad (6.21)$$

Якщо джерело стоїть на уступі, то має значення

$$\varphi = -X_0/a_0.$$

У випадку рівної місцевості або слабо пересічного рельєфу з перепадом висот не вище 50 м на 1 км значення $h=1$.

Для джерела, яке розташоване в зоні впливу декількох ізольованих перешкод, визначають значення (h) для кожного з них і використовують найбільше (h_{\max}).

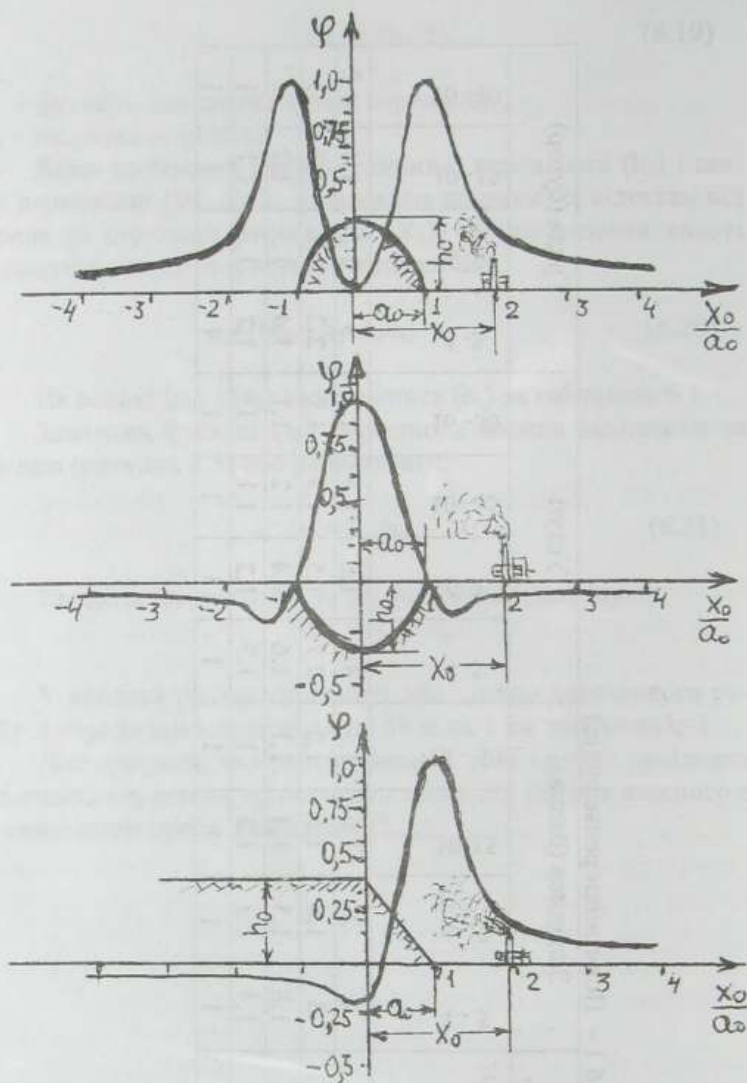


Рисунок 6.5 – Функція рельєфу (φ)

27

ТЕМА 7 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДОМШОК У ПРИЗЕМНОМУ ШАРІ АТМОСФЕРИ

7.1 Моделі концентрації максимального рівня забруднення атмосфери точковим стаціонарним джерелом

Максимальний рівень приземної концентрації (C_m^x , мг/м^3) забруднюючої речовини при викиді гарячої пилогазоповітряної суміші ($\Delta T > 0^\circ\text{C}$; $f < 100$) із одиничного джерела з круглим отвором за несприятливих метеоумов на відстані (X_m) від джерела обчислюється за формулою

$$C_m^x = \frac{MAFnmh}{H^2 \sqrt[3]{V\Delta T}}, \quad (7.1)$$

де M – маса речовини, яка викидається в повітря за одиницю часу, г/с , т/рік ;

A – коефіцієнт температурної стратифікації атмосфери;

F – коефіцієнт осідання речовини в повітрі;

H – висота джерела над рівнем землі, м ;

V – витрати пилогазоповітряної суміші викиду, $\text{м}^3/\text{с}$;

ΔT – перегрів факела, $^\circ\text{C}$;

n_r – параметр умов виходу гарячого факела;

m – коефіцієнт умов виходу гарячого факела;

h – коефіцієнт рельєфу місцевості.

Максимальний рівень (C_m^x , мг/м^3) приземної концентрації домішок у повітрі при холодному викиді ($\Delta T = 0^\circ\text{C}$; $f \geq 100$) з одиничного джерела з круглим отвором за несприятливих метеоумов на відстані (X_m) від джерела визначається виразом

$$C_m^x = \frac{MAFDn_x h}{8V^3 \sqrt{H^4}} = \frac{MAFhn_x}{7,1 \sqrt{VW^3} \sqrt{H^4}}, \quad (7.2)$$

де D – діаметр отвору джерела, м;

W – швидкість виходу викиду з отвору джерела, м/с;

n_x – параметр умов виходу холодного факела.

У випадку гранично малих небезпечних швидкостей вітру (U) ($P < 0,5$) максимальний рівень концентрації як для гарячих ($\Delta T > 0^\circ\text{C}$; $f < 100$ і $Pr < 0,5$), так і для холодних ($\Delta T = 0^\circ\text{C}$; $f \geq 100$ і $Pr < 0,5$) викидів на відстані (X_m) оцінюється формулою

$$C_m^u = \frac{MAFhm_1}{\sqrt[3]{H^7}}, \quad (7.3)$$

де $m_1 = 0,9$ – для холодних викидів;

$m_1 = 2,86$ – для гарячих викидів.

Формули для розрахунку C_m^x і C_m^u є лише приватним випадком загальної формули для C_m^r . Розрахункові значення максимального рівня концентрації домішок теоретично оцінюють забруднення атмосфери від одного джерела без обліку фону. Проте, крім них, існують методи (моделі) розрахунку забруднення повітря лінійними джерелами, площадними, груповими, з урахуванням сумарної дії кількох речовин, з урахуванням фонових концентрацій та розрахунку рівня фонового забруднення, а також забруднення повітря на промайданчику.

7.2 Модель небезпечної відстані, на якій концентрація досягає максимального рівня

Небезпечна відстань (X_m) – це віддаль від джерела викиду, на якій при несприятливих метеоумовах приземна концентрація домішку досягає максимального значення (C_m).

Небезпечна відстань визначається формулою

$$X_m = 0,25 \cdot dH(5-F), \quad (7.4)$$

де H – висота джерела, м;

F – коефіцієнт осідання речовини в повітрі;

d – параметр факела викиду.

При постійній висоті джерела (H) викиду і незмінних інших умовах небезпечна відстань (X_m) не залежить від маси (M) викиду (рисунок 7.1).

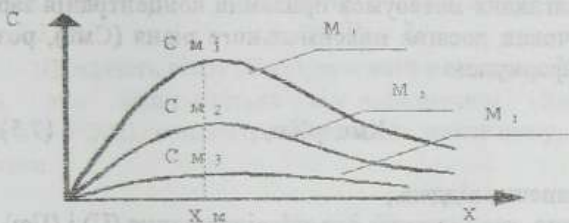


Рисунок 7.1 – Положення значення (X_m) при різній масі викиду (M) та постійній висоті джерела ($H = \text{const}$)

При постійній масі викиду (M) і незмінних інших умовах небезпечна відстань (X_m) із збільшенням висоти (H) джерела теж збільшується (рисунок 7.2).

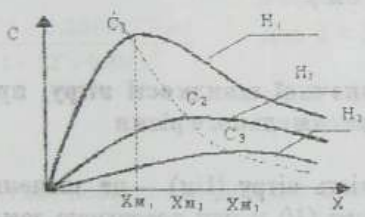


Рисунок 7.2 – Положення значення (X_m) при різній висоті джерела (H) та постійній масі викиду ($M = \text{const}$)

Небезпечна відстань (X_m) також залежить від агрегатного стану забруднюючих речовин. При цьому спостерігається, що більш легкі домішки (гази) створюють поле максимальної їх концентрації на більш далекій відстані від джерела порівняно із більш важкими.

Відстань (X_{mi}) від джерела викиду на якій при швидкості вітру (U) (яка відрізняється від небезпечної швидкості (U_m)) та за несприятливих метеоумов приземна концентрація забруднюючих речовин досягає максимального рівня (C_{mi}), розраховується за формулою

$$X_{mi} = p X_m, \quad (7.5)$$

де X_m – небезпечна віддаль;

p – величина, яка залежить від співвідношення (U) і (U_m).

Значення показника (p) обчислюються для наступних трьох режимів.

$$\text{Для } U / U_m \leq 0,25$$

$$p = 3.$$

$$\text{Для } 0,25 < U / U_m \leq 1$$

$$p = 1 + 8,43(1 - U/U_m)^5. \quad (7.6)$$

$$\text{Для } U / U_m > 1$$

$$p = 0,68 + 0,32 (U / U_m).$$

7.3 Модель небезпечної швидкості вітру, при якій концентрація досягає максимального рівня

Небезпечна швидкість вітру (U_m) – це значення його швидкості на рівні флюгера (10 м над поверхнею землі), при якій на небезпечній відстані (X_m) приземна концентрація досягає максимального рівня (C_m).

Для гарячих викидів ($f < 100$) маємо

$$\begin{aligned}
 U_m &= 0,5 && \text{для } Pr \leq 0,5, \\
 U_m &= Pr && \text{для } 0,5 < Pr \leq 2, \\
 U_m &= Pr(1 + 0,12\sqrt{f}) && \text{для } Pr > 2.
 \end{aligned}
 \tag{7.7}$$

Для холодних викидів ($f \geq 100$)

$$\begin{aligned}
 U_m &= 0,5 && \text{для } P_x \leq 0,5, \\
 U_m &= P_x && \text{для } 0,5 < P_x \leq 2, \\
 U_m &= 2,2 P_x && \text{для } P_x > 2.
 \end{aligned}
 \tag{7.8}$$

Швидкість вітру (U_{mx}), при якій на відстані (X) від джерела, яка відрізняється від небезпечної (X_m) відстані (тобто $X \neq X_m$), концентрація досягає максимуму, оцінюється виразом

$$U_{mx} = f_U \cdot U_m, \tag{7.9}$$

де U_m – небезпечна швидкість вітру, при якій на небезпечній відстані (X_m) концентрація досягає максимального рівня (C_m);

f_U – величина, яка залежить від співвідношення (X) і (X_m).

Значення показника (f_U) розраховують для наступних випадків:

$$\begin{aligned}
 f_U &= 1 && \text{для } X / X_m \leq 1, \\
 f_U &= \frac{0,75 + 0,25(X / X_m)}{1 + (X / 9X_m)^2} && \text{для } 1 < X / X_m \leq 8, \\
 f_U &= 0,25 && \text{для } 8 < X / X_m < 80, \\
 f_U &= 0,1 && \text{для } X / X_m \geq 80.
 \end{aligned}
 \tag{7.10}$$

Отже, небезпечна швидкість вітру (U_{mx}), при якій формується максимальний рівень забруднення на різній відстані (X) від джерела, може мати різне значення, відмінене від (U_m).

7.4 Моделі концентрацій забруднюючих речовин на довільній відстані від джерела викиду

На довільній відстані ($X \neq X_m$) від джерела при небезпечній швидкості вітру (U_m) приземна концентрація речовини (C_x) в атмосфері за віссю факела викиду розраховується за формулою

$$C_x = S_x C_m, \quad (7.11)$$

де C_m – максимальна концентрація при небезпечній швидкості вітру (U_m) на небезпечній відстані (X_m);

S_x – величина, яка визначається залежно від співвідношення (X) і (X_m) та коефіцієнта осідання (F).

Значення показника (S_x) обчислюють для наступних випадків (рисунок 7.3).

Для $X / X_m \leq 1$

$$S_x = 3 (X / X_m)^4 - 8 (X / X_m)^3 + 6 (X / X_m)^2. \quad (7.12)$$

Для $1 < X / X_m \leq 8$

$$S_x = \frac{1,13}{1 + 1,13(X / X_m)^2}. \quad (7.13)$$

Для $X / X_m > 8$ та $F \leq 1,5$

$$S_x = \frac{X / X_m}{120 + 3,58(X / X_m)^2 - 35,2(X / X_m)}. \quad (7.14)$$

Для $X / X_m > 8$ та $F > 1,5$

$$S_x = \frac{1}{0,1(X / X_m)^2 + 2,47(X / X_m) - 17,8}. \quad (7.15)$$

Для низьких ($H < 10$ м) та наземних ($H \leq 2$) джерел при ($X / X_m < 1$) величина S_x має значення

$$S_{xH} = 0,125 [(10 - H) + (H - 2)]. \quad (7.16)$$

На довільній відстані ($X \neq X_m$) від джерела викидів при швидкості вітру ($U_{mx} \neq U_m$) максимальна концентрація (C_{mx})

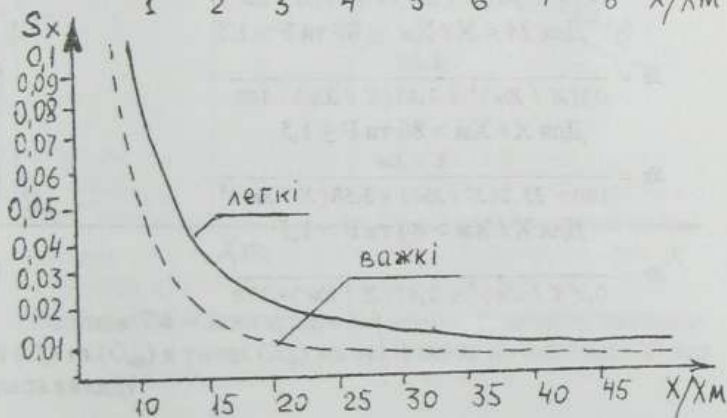
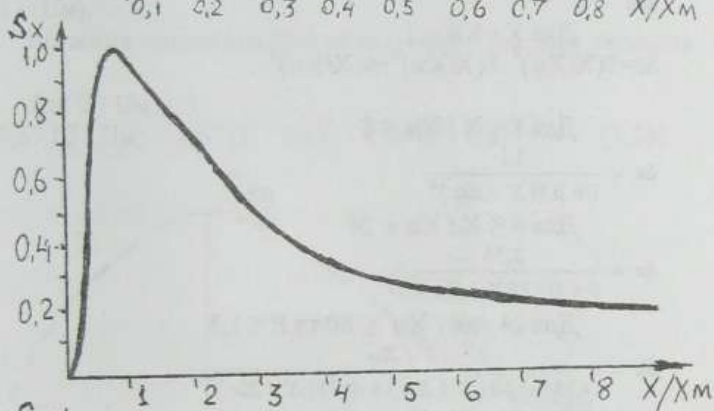
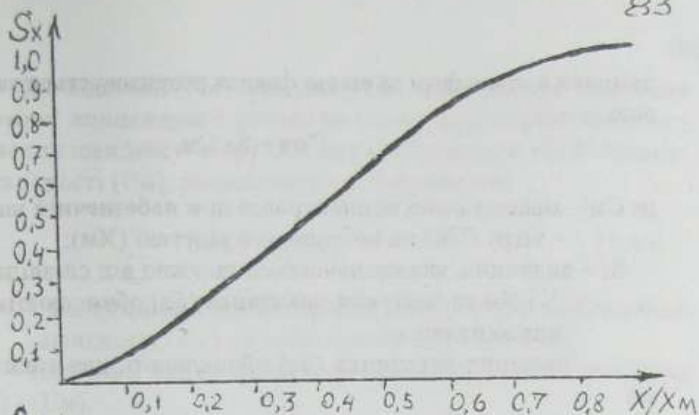


Рисунок 7.3 – Залежність (S_x) від співвідношення

домішок в атмосфері за віссю факела розраховується за формулою

$$C_{MX} = Sz C_M, \tag{7.17}$$

де C_M – максимальна концентрація при небезпечній швидкості вітру (U_M) на небезпечній відстані (X_M);

Sz – величина, яка визначається залежно від співвідношення X і X_M та значення показника (Sz) обчислюють для таких випадків.

Значення показника (Sz) обчислюють для таких випадків.

Для $X / X_M \leq 1$

$$Sz = 3(X/X_M)^4 - 8(X/X_M)^3 + 6(X/X_M)^2. \tag{7.18}$$

Для $1 < X / X_M \leq 8$

$$Sz = \frac{1,1}{1 + 0,1(X / X_M)^2}. \tag{7.19}$$

Для $8 < X / X_M < 24$

$$Sz = \frac{2,55}{9 + 0,13(X / X_M)^2}. \tag{7.20}$$

Для $24 < X / X_M \leq 80$ та $F \leq 1,5$

$$Sz = \frac{X / X_M}{1435 - 140(X / X_M) + 4,75(X / X_M)^2}. \tag{7.21}$$

Для $24 < X / X_M \leq 80$ та $F > 1,5$

$$Sz = \frac{2,26}{0,1(X / X_M)^2 + 7,41(X / X_M) - 160}. \tag{7.22}$$

Для $X / X_M > 80$ та $F \leq 1,5$

$$Sz = \frac{X / X_M}{120 - 35,2(X / X_M) + 3,58(X / X_M)^2}. \tag{7.23}$$

Для $X / X_M > 80$ та $F > 1,5$

$$Sz = \frac{1}{0,1(X / X_M)^2 + 2,47(X / X_M) - 178}. \tag{7.24}$$

На відстані (X_m) від джерела максимальне значення приземної концентрації речовини (C_{m1}) за несприятливих метеоумов та швидкості вітру (U), яка відрізняється від небезпечної швидкості (U_m), розраховується за формулою

$$C_{m1} = S_u C_m, \quad (7.25)$$

де C_m – максимальна концентрація домішки для небезпечної швидкості (U_m) на небезпечній відстані (X_m);

S_u – величина, яка визначається залежно від співвідношення (U) і (U_m).

Значення показника (S_u) обчислюють для двох режимів вітру.

Для $U / U_m \leq 1$

$$S_u = 0,67 (U / U_m) + 1,67 (U / U_m)^2 - 1,34 (U / U_m)^3. \quad (7.26)$$

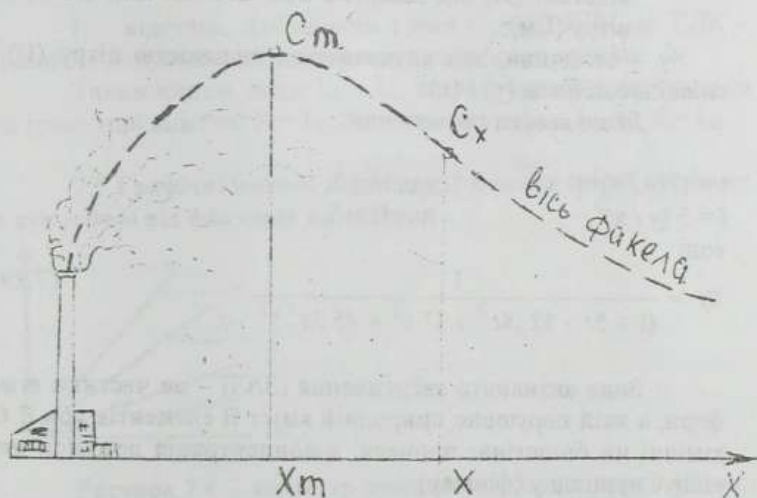


Рисунок 7.4 – Ілюстрація до оцінки величини концентрації (C_x) та (C_{m1}) в точці (X_f) на осі факела на відстані (X) від джерела викиду

$$S_{\text{ш}} = \frac{\text{Для } U / U_{\text{м}} > 1}{\frac{3(U / U_{\text{м}})}{2(U / U_{\text{м}})^2 - (U / U_{\text{м}}) + 2}} \quad (7.27)$$

При виконанні розрахунків ($S_{\text{ш}}$) не використовують швидкість $U < 0,5$ м/с та швидкість, перевищення якої в багаторічному режимі менше 5% випадків за рік.

На довільній відстані (X) від джерела значення концентрації (C_y) на віддалі (y) по перпендикуляру до осі факела викиду розраховується за формулою

$$C_y = S_y C_x, \quad (7.28)$$

де C_x – концентрація забруднюючої речовини на осі факела на відстані (X) від джерела при небезпечній швидкості вітру ($U_{\text{м}}$);

S_y – величина, яка визначається швидкістю вітру (U) та співвідношенням (y) і (x).

Якщо ввести позначення

$$t = U (y / x)^2 \quad \text{для } U \leq 5,$$

$$t = 5 (y / x)^2 \quad \text{для } U > 5,$$

тоді

$$S_y = \frac{1}{(1 + 5t + 12,8t^2 + 17t^3 + 45,1t^4)^2} \quad (7.29)$$

Зона активного забруднення (ЗАЗ) – це частина атмосфери, в якій порушено природній вміст її елементів або її біохімічні чи біологічні процеси, а концентрація домішок перевищує природну (фонову).

Згідно з регламентом для кожного джерела викидів в атмосферне повітря зона впливу визначається як найбільша з двох відстаней до джерела:

$$L_1 = 10 X_{\text{м}}, \text{ де } X_{\text{м}} \text{ – небезпечна відстань;}$$

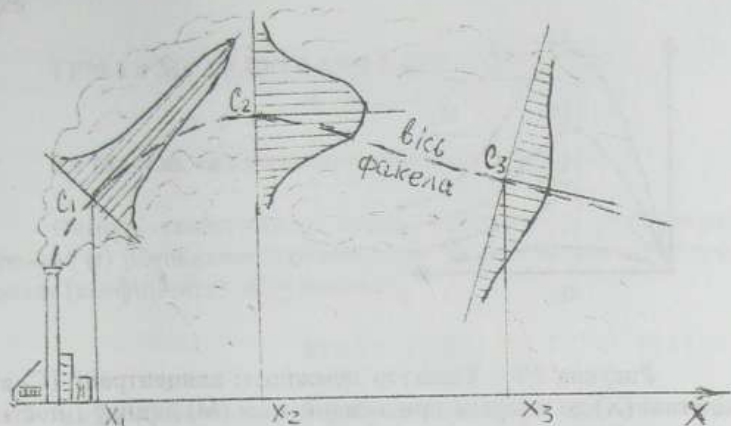


Рисунок 7.5 – Ілюстрація до оцінки величини концентрації (C_y) на осі факела на різних відстанях (X) від джерела

L_2 – відстань, починаючи з якої $C \leq 0,5$ ГДК, де ГДК – гранично допустима концентрація для даної речовини.

Таким чином, якщо $L_1 > L_2$, то розрахунки виконуються до граничної відстані $X = L_1$. Навпаки, якщо $L_1 < L_2$, то $X = L_2$.

7.5 Графічні моделі залежності концентрації домішки в атмосфері від факторів впливу

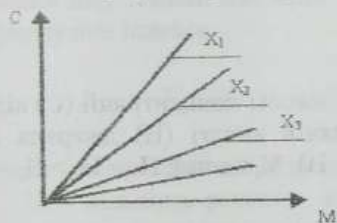


Рисунок 7.6 – характер залежності концентрації (C) від маси викиду (M) при постійній висоті (H) джерела на заданій відстані (X) до джерела: $C = f(M)$; $H = \text{const}$; $X_1 > X_2 > X_3$

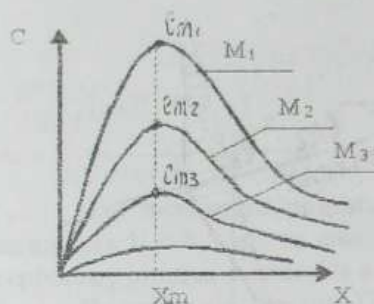


Рисунок 7.7 – Характер залежності концентрації (C) від відстані (X) до джерела при заданій масі (M) викиду і постійній висоті (H) джерела: $C = f(X, M)$; $H = \text{const}$; $M_1 > M_2 > M_3$

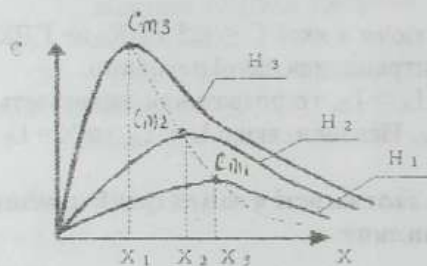


Рисунок 7.8 – Характер залежності концентрації (C) від відстані (X) до джерела при заданій висоті (H) джерела і постійній масі (M) викиду: $C = f(X, H)$; $M = \text{const}$; $H_1 > H_2 > H_3$

ТЕМА 8 МОДЕЛЮВАННЯ ЯКОСТІ СТАНУ АТМОСФЕРИ

8.1 Модель екологічного стану атмосфери

Оцінка екологічного стану забруднення атмосфери окремою (i) речовиною здійснюється за допомогою простого індексу (коефіцієнта) забруднення:

$$K_i = C_i / \text{ГДК}_i, \quad (8.1)$$

де C_i – вміст (фактичний, розрахунковий) i -го домішки в повітрі;

ГДК $_i$ – гранично допустима концентрація цієї речовини в повітрі.

Безпечний стан повітряного басейну забезпечується виконанням умови

$$K_i \leq 1; C_i \leq \text{ГДК}_i. \quad (8.2)$$

У випадку присутності одночасно суміші кількох (N) речовин, яким притаманний ефект незалежної дії, показник забруднення атмосфери розраховується тільки для тих (N) речовин цієї суміші, для яких коефіцієнт забруднення $K_i > 1$ за формулою індексу

$$I = 1 + \sum (K_i - 1); i = \overline{1, N_1}; N_1 \leq N, \quad (8.3)$$

де K_i – коефіцієнт забруднення повітря для i -го домішки,

N_1 – кількість речовин, які одночасно присутні в повітрі і для яких має місце $K_i > 1$.

Для решти речовин ($N_2 = N - N_1$) цієї суміші стан повітря оцінюється умовою ($K_j \leq 1; j = \overline{N_1, N}$).

При одночасній сумісній присутності в атмосфері кількох (N) речовин, яким притаманний ефект сумачії їх дії, для

кожної (j) групи таких речовин одночасного впливу їх значення концентрації зводять до значення концентрації (C_j^n) однієї з них

$$C_j^n = C_1 + \sum C_i \frac{ГДК_i}{ГДК_1}; \quad i = \overline{2, N}, \quad (8.4)$$

де C_1 – концентрація домішки, до якого виконується зведення концентрації (C_i) всіх інших домішок цієї групи сумарно;

N – кількість речовин у даній j – й групі сумарно.

Для забезпечення безпечного стану повітряного басейну рівень його забруднення цією групою речовин повинен задовольняти умову

$$\sum \frac{C_i}{ГДК_i} \leq 1; \quad i = \overline{1, N}. \quad (8.5)$$

Індекс екологічного стану атмосфери дуже грубо оцінює рівень забруднення повітря і тому має обмежене застосування тільки для оцінки стану в першому наближенні за наявності забруднення.

8.2 Модель стану атмосферного повітря

Оцінка фізичного стану забруднення атмосферного повітря окремою (i) речовиною виконується зведенням її до 3 – го класу небезпеки за допомогою коефіцієнта

$$K_i = \left(\frac{C_i}{ГДК_i} \right)^{m_i}, \quad (8.6)$$

де C_i – концентрація i – го домішку в повітрі;

$ГДК_i$ – гранично допустима концентрація цієї речовини в повітрі;

m_i – коефіцієнт зведення класу небезпеки i – го домішку до 3 – го класу (таблиця 8.1).

Таблиця 8.1 - Значення коефіцієнта зведення до 3 - го класу

Клас небезпеки забруднювача	1	2	3	4
Значення m_i	1,7	1,3	1	0,8

У випадку присутності суміші кількох (N) забруднювачів у повітрі показник стану атмосфери для цієї суміші розраховується величиною індексу

$$I_{\Sigma} = \sum_i (K_i - 1) + \sum_j \left(\sum_k \frac{C_k}{ГДК_k} - 1 \right), \quad (8.7)$$

де N_1 - кількість незалежних домішок ($i = 1, \overline{N_1}$);

N_2 - кількість груп сумачі ($j = 1, \overline{N_2}$);

N_3 - кількість речовин у суміші j -ї групи сумачі ($k = 1, \overline{N_3}$).

Індекс фізичного стану атмосфери має вузькі межі застосування - тільки для оцінки стану повітря. Він не може бути використаний для оцінки впливу забрудненої атмосфери на об'єкти - реципієнти.

8.3 Модель гігієнічного стану атмосфери населених пунктів

Оцінка небезпеки забруднення атмосфери міст для їх населення здійснюється за допомогою індексу

$$I_{\Sigma} = \sum_i \frac{K_{\Sigma i}}{ГДК_i} \left(\frac{C_i}{K_{\Sigma i}} - \Pi_i \right); \quad i = 1, \overline{N}, \quad (8.8)$$

де Π_i - поріг дії на здоров'я людей i -го домішку в повітрі;

$K_{\Sigma i}$ - коефіцієнт ефекту сумісної дії речовин суміші даного складу;

K_i – коефіцієнт впливу класу небезпеки i – го домішку;

N – кількість домішок, які одночасно присутні в повітрі.

Значення коефіцієнта (Кд), який враховує ефект спільної дії суміші речовин по відношенню до ефектів при ізольованій дії цих речовин, які складають дану суміш, можна визначити за даними таблиці 8.2.

Індекс гігієнічного стану атмосфери міст має застосування для оцінки небезпеки забруднення повітря на здоров'я населення. Він може бути використаний як для задач дослідження динаміки стану, так і для дослідження впливу рівня забруднення на захворюваність людей у зоні цього забруднення.

Таблиця 8.2 - Коефіцієнт ефекту спільної дії речовин (Кд)

Тип ефекту дії суміші	Значення Кд
1	2
Незалежна дія кожного домішку простої суміші з (N) речовин	N
Дія простої суміші з (N) речовин за типом сумачії їх ефектів при ізольованій дії	1
Посилення ефектів дії (N) речовин простої суміші	0,5
Послаблення ефектів дії (N) речовин простої суміші	\sqrt{N}
Комбінована дія простої суміші з (N) речовин з невідомим характером дії	\sqrt{N}
Комбінована дія складної суміші з (N) речовин, яка складається з (N_1) речовин (суміші), характер дії (Кд) яких відомий, та з (N_2) речовин з невідомим характером дії із зазначеними сумішами	$\sqrt{\sum_{i=1}^{N_1} K_{d_i} + N_2}$

Для речовин 3 – го класу небезпеки $K_{ki} = 1$.

Якщо ефект дії окремого (i) домішку не залежить від класу небезпеки цієї речовини, тоді коефіцієнт $K_{ki} = 1$. В усіх інших випадках значення коефіцієнта (K_k) зведення концентрації i – го домішку j – го класу небезпеки до того, який характер для 3 – го класу, визначається величиною

$$K_{ki} = (3 / j)^{m_j K_i}, \quad (8.9)$$

де K_i – кратність концентрації i – го домішку значенню його

$\Gamma ДК_i$, тобто $K_i = C_i / \Gamma ДК_i$;

m_j – показник ступеня, який залежить від (j) класу цього домішку (таблиця 8.3).

Таблиця 8.3 - Значення показника ступеня (m) від класу небезпеки речовин

Клас (j) небезпеки i – го домішку	1	2	4
Значення (m_j)	2,89	1,55	1,05

Деякі орієнтовні значення коефіцієнта зведення (K_k) класу небезпеки речовин до 3 – го класу наведені в таблиці 8.4.

Таблиця 8.4 - Коефіцієнт зведення (Ккі) концентрації речовин до 3 – го класу небезпеки за даними (Кі)

Кі=Ci/ГДКі	Значення Ккі		
	1-й клас	2-й клас	4-й клас
1	1,0	1,0	1,0
1,2	1,286	1,051	0,976
1,5	1,749	1,117	0,948
1,7	2,079	1,156	0,933
2	2,601	1,208	0,913
2,5	3,538	1,284	0,887
3	4,549	1,35	0,866
3,5	5,626	1,408	0,848
4	6,763	1,46	0,834
5	9,2	1,552	0,81
6	11,830	1,631	0,791
7	14,632	1,701	0,775
8	17,589	1,764	0,761
9	20,691	1,822	0,75
10	23,927	1,875	0,738
15	48,850	2,09	0,7
20	62,2	2,26	0,675

8.4 Математична модель ранжування стану атмосфери

Оцінка рівня забруднення атмосферного басейну визначається величиною зваженого агрегатного індексу

$$I_i = \frac{\sum_{j=1}^N b_j D_j}{\sum_{j=1}^N b_j P_j} ; i = \overline{1, N}, \quad (8.10)$$

де D_i – фактичний рівень (доза) i – го забруднювача (домішки) в повітрі;

P_i – базисний рівень i – го домішки,

b_i – вага i – го домішки при регламентованому рівні забруднення повітря речовинами суміші даного складу (при базовому стані);

F_j – функція ефектів дії суміші забруднюючих речовин в атмосфері для реципієнтів j – го виду;

N – кількість домішок, які одночасно присутні в атмосфері.

Показником рівня (Д) окремого забруднювача повітря може виступати його кількісна доза (маса, концентрація). Базисним станом (Р) атмосфери (тобто стан, з яким порівнюють) може бути фоновий, регламентований стандартами, санітарними нормами або її стан в якийсь момент часу чи в якійсь точці простору. Це дозволяє виконувати ранжування стану у будь-який момент чи у будь-якому місці з базисним станом атмосфери.

Рівень небезпеки забруднення атмосферного повітря для населення визначається величиною зваженого агрегатного індексу за формулою

$$I_{ан} = \frac{N}{K_d} * \frac{\sum b_i C_i^p}{\sum b_i ГДК_i}; \quad i = \overline{1, N}, \quad (8.11)$$

де C_i^p – рвведена до 3 – го класу небезпеки концентрації i – го домішки в повітрі;

b_i – вага i – го домішки при регламентованому рівні забруднення повітря речовинами суміші даного складу;

K_d – коефіцієнт ефекту спільної дії речовин;

N – кількість речовин, які одночасно присутні в атмосфері.

Нормативна вага (b_i) i – го домішки в сумарній масі речовин регламентується величиною

$$b_i = \frac{ГДК_i}{\sum ГДК_i}; \quad i = \overline{1, N}. \quad (8.12)$$

При цьому має місце умова $\sum b_i = 1$.

Зведення до 3 - го класу небезпеки концентрації i -го домішку j - го класу за формулою

$$C^D_i = K_{ki} C_i, \quad (8.13)$$

де C_i - концентрація (фактична, розрахункова) речовини i -го виду;

K_{ki} - коефіцієнт класу небезпеки домішку.

Цей універсальний методичний підхід дозволяє диференційовано оцінювати стан атмосфери по відношенню до різних реципієнтів.

Для лісових біоценозів індекс атмосфери набуває вигляду

$$I_{ал} = \frac{\sum b_i C_i}{\sum b_i \Gamma_{ГДК}}, \quad (8.14)$$

де $\Gamma_{ГДК}$ - гранично допустима концентрації речовин для дерев;

C_i - концентрація i - го домішку в повітрі.

Для рослинного світу індекс має вигляд

$$I_{ар} = \frac{\sum b_i C_i}{\sum b_i \Gamma_{ГДК_{рi}}}, \quad (8.15)$$

де $\Gamma_{ГДК_{р}}$ - гранично допустимі концентрації речовин для рослин.

Оскільки значення функції ефектів дії суміші домішок на рослини та дерева поки що не встановлені, то у даному випадку $F = 1$.

Висновки

Таким чином, на сьогодні інформаційно-методична база моделювання і прогнозування стану, зокрема, атмосфери, дозволяє на відносно задовільному науковому рівні виконувати дослідження рівня забруднення, стану середовища, впливу забрудненого середовища на живі організми та господарські об'єкти.

Успішне розв'язання цих задач багато в чому залежить від того, наскільки доцільно спеціаліст зможе використати багатозначний арсенал видів моделей та типів процесів моделювання. У цьому першочергову допомогу йому можуть надати базові поняття теорії систем і особливо системного аналізу, які викладені в першому розділі даного курсу.

Основні теоретичні положення моделювання стану атмосфери, викладені у другому розділі цього курсу, стануть у нагоді при дослідженні джерел забруднення повітря, моделюванні розповсюдження поля забруднення, факторів впливу на стан забруднення атмосфери і особливо будуть корисні для оцінки концентрації забруднюючих речовин у приземному шарі повітря та якості атмосферного повітря.

Важливим моментом слід вважати можливість ранжувати стан атмосфери, досліджувати її динаміку в часі і просторі за допомогою розглянутих моделей.

Список літератури

1. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование атмосферы. – Л., 1985.
2. Владимиров А.М. и др. Охрана окружающей среды. – Л., 1991.
3. Егоров В.А. и др. Математические модели глобального развития. – Л., 1980.
4. Марчук Г.И. Математические модели в проблеме окружающей среды. – М., 1982.
5. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий // ГОСКОМГИДРОМЕТ. – Л., 1987.
6. Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь – справочник. – М., 1990.
7. Рыбалов А.А. К вопросу о критериях комплексной оценки качества атмосферного воздуха / Город и окружающая среда – Челябинск, 1985.
8. Рыбалов А.А., Черепов Е.М. Математическое обоснование комплексного показателя оценки качества окружающей среды / Гигиена жилой среды. – М., 1987.
9. Санитарная охрана атмосферного воздуха городов / Под ред. Р.С. Гиндельскольд и др. – М., 1976.
10. Yu.A. Izzaeb. Problems of ecological monitoring and ecosystem modeling. – Leningrad, 1985.