

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Л.М. Полетаєва

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ
СТАНУ ДОВКІЛЛЯ
(Атмосферне повітря)**

Конспект лекцій

Одеса
Одеський державний екологічний університет
2021

УДК 504
П-49

Полетаєва Л.М.

П-49 Моделювання та прогнозування стану довкілля (атмосферне повітря): конспект лекцій. Одеса, Одеський державний екологічний університет, 2021. 96 с. ISBN 978-966-186-186-1

Конспект лекцій присвячений проблемі застосування методів математичного моделювання стану та прогнозу забруднення атмосферного повітря.

Конспект лекцій розраховано на студентів очної, дистанційної/заочної форми навчання спеціальності 101 “Екологія” при вивченні дисципліни “Моделювання та прогнозування стану довкілля”.

УДК 504

Рекомендовано методичною радою Одеського державного екологічного університету Міністерства освіти і науки України як конспект лекцій (протокол №9 від 24.06.2021 р.)

ISBN 978-966-186-186-1

© Л.М. Полетаєва, 2021
© Одеський державний екологічний університет, 2021

З М І С Т

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
МОДУЛЬ ЗМ-Л1. ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ ПРО МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИДИ ПРОГНОЗІВ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ	7
1 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЯК ОСНОВА ПРОГНОЗІВ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ	7
1.1 Постановка загальної задачі розрахунку поширення атмосферних домішок	7
1.2 Рівняння балансу для будь-якої субстанції	10
2 ВПЛИВ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ І СИНОПТИЧНИХ УМОВ НА ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ У МІСТІ	14
2.1 Метеорологічні аспекти розсіювання домішок в атмосфері	14
2.2 Вплив мікрометеорологічних умов у місті на формування рівня забруднення атмосфери	21
2.3 Вплив синоптичних умов на забруднення атмосфери	25
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ДОМІШОК В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ	32
3.1 Рівняння балансу атмосферних домішок	32
3.2 Початкові і граничні умови	35
3.3 Вплив орографії на поширення домішки від джерела	38
3.4 Рівняння балансу атмосферних домішок при стаціонарних процесах при постійному напрямку вітру	40
3.5 Чисельне моделювання процесів забруднення атмосфери великих міст і їхнього впливу на термічний режим атмосфери	43
4 ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗІВ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ У МІСТІ	50
4.1 Фізичні основи прогнозування забруднення повітря	50
4.2 Чисельний прогноз концентрації шкідливої домішки по дифузійній моделі	52

4.3	Практичні питання прогнозу забруднення повітря в районі окремих джерел	57
4.4	Прогноз концентрації шкідливої домішки по гаусовій моделі	59
5	СИНОПТИКО-СТАТИСТИЧНІ ПРОГНОЗИ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ У МІСТІ	64
5.1	Узагальнені показники забруднення повітря по місту в цілому	65
5.2	Вибір предикторів для синоптико-статистичних прогнозів	67
5.3	Прогноз метеорологічних умов забруднення атмосфери	69
5.4	Прогнозування забруднення повітря методом лінійного регресійного аналізу	74
5.5	Прогнозування забруднення повітря методом розпізнавання образів	78
5.6	Метод послідовної графічної регресії	80
6	ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ.	86
6.1	Загальні принципи розробки прогнозу забруднення атмосфери	86
6.2	Оцінка ефективності методів прогнозу забруднення повітря	88
6.3	Організація робіт по прогнозуванню забруднення повітря. Складання попереджень	90
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	94

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АП - атмосферне повітря
ВРЗА - високий рівень забруднення атмосфери
ГГО - Головна геофізична обсерваторія ім.О.І.Воейкова, м. Санкт-Петербург
ГДК - гранично допустима концентрація
ЗА - забруднення атмосфери
ЗП – забруднення повітря
ЗР – забруднювальна речовина
ММ - математичне моделювання
МП – метеорологічні параметри
МППР - метод послідовної графічної регресії
МППР - метод покрокової регресії
МРО - метод розпізнавання образів
МУ – метеорологічні умови
МУЗ – метеорологічні умови забруднення
МУВЗ – метеорологічні умови високого забруднення
НС - навколишнє середовище
НМУ - несприятливі метеорологічні умови
ОНС - охорона навколишнього середовища
ПБ – повітряний басейн
Пн – північ
ПнС – північно-схід
С – схід
ПдС – південно-схід
Пд - південь
ПдЗ – південно-захід
З - захід
ПнЗ – північно-захід
РЗА - рівня забруднення атмосфери
РЗП – рівня забруднення повітря
ТЕС – теплова електрична станція
ШР - шкідлива речовина
Zn - циклон
Az – антициклон

ВСТУП

Методи математичного моделювання процесів розповсюдження та трансформації забруднювальних домішок та прогнози, які базуються на цих методах, можуть не тільки відповісти на запитання про сучасний стан довкілля, але і допомогти у передбаченні його майбутнього стану.

Метою вивчення курсу “Моделювання та прогнозування стану довкілля” є формування у студентів теоретичних знань і практичних навичок у сфері математичного моделювання реальних процесів розповсюдження шкідливих домішок у довкіллі, складання прогнозів забруднення довкілля та застосування їх для регулювання техногенних викидів підприємств до навколишнього середовища. Даний конспект лекцій відображає перший розділ дисципліни “Моделювання та прогнозування стану довкілля”, присвячений атмосферному повітрю (АП). Зміст конспекту лекцій відповідає силлабусу дисципліни “Моделювання та прогнозування стану довкілля”.

Головне місце у конспекті лекцій “Моделювання та прогнозування стану довкілля” приділяється термінам і поняттям, що застосовуються в межах означеного курсу; основним принципам, підходам та методам оцінки та прогнозу стану атмосферного повітря; головним факторам середовища, що впливають на забруднення АП; основним математичним моделям розрахунку розповсюдження шкідливих домішок; типам прогнозів забруднення повітря.

Більш докладно висвітлені: чисельні та статистичні моделі розрахунку розповсюдження шкідливих домішок в АП; узагальненні показники забруднення середовища; фактори та умови, які формують концентрацію забруднюючої домішки в АП; існуючі прогнози забруднення повітря з врахуванням регіональних особливостей окремих міст та підприємств; недоліки існуючих моделей і схем прогнозу та шляхи їх удосконалення і розвитку.

Конспект лекцій розраховано на студентів очної, дистанційної/заочної форми навчання спеціальності 101 “Екологія” при вивченні дисципліни “Моделювання та прогнозування стану довкілля” для отримання бакалаврського рівня вищої освіти.

МОДУЛЬ ЗМ-Л1. ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ ПРО МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИДИ ПРОГНОЗІВ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ

1 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЯК ОСНОВА ПРОГНОЗІВ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ

1.1 Постановка загальної задачі розрахунку поширення атмосферних домішок

Однією з основних проблем, що виникли в зв'язку з негативними наслідками науково-технічного прогресу, є охорона навколишнього середовища (ОНС) від забруднення його різними по своїй природі хімічними речовинами, контроль і регулювання ступеня впливу виробництва на його санітарний стан.

При вивченні різних фізичних явищ застосовуються два методи досліджень, що дозволяють одержати кількісні закономірності для аналізу явищ. У першому випадку йдуть по шляху узагальнення **емпірично** встановлених закономірностей; у другому виходять зі строгого **теоретичного** розгляду проблеми. Чисто теоретичні, як і чисто емпіричні методи, зустрічаються вкрай рідко внаслідок того, що на практиці необхідно витягти максимальну кількість інформації як емпіричної, так і теоретичної.

При експериментальному методі дослідження кожне конкретне явище повинне бути самостійним об'єктом вивчення. Це обмежувальна обставина побудови моделей природних процесів при прогнозуванні забруднення навколишнього середовища (НС) у зв'язку з введенням нових потужностей, будівництвом і модернізацією промислових підприємств.

Узагальнення результатів досвіду варто шукати в тих областях теоретичної фізики, що розкривають фізичну сутність явищ і прибігають до вираження цих явищ мовою математики.

Моделювання (по Н.Ф. Реймерсу) – метод дослідження складних об'єктів, явищ і процесів шляхом їхнього спрощеного імітування (натурного, математичного, логічного). Ґрунтується на теорії подоби [11].

Модель – це 1) фізична (матеріально-натурна) чи знакова (математична, логічна) звичайно спрощена подоба реального об'єкта,

явища чи процесу; 2) зменшена подoba реального об'єкта: діюча модель чи тільки імітуюча форма чого-небудь, макет; 3) схема, зображення чи опис якого-небудь явища чи процесу в природі і суспільстві.

Моделювання процесів поширення домішок в НС повинно використовувати самі загальні закони природи, яким придається форма, що відповідає специфічним особливостям досліджуваного явища. Математичним апаратом моделювання є в основному диференціальні рівняння.

Розгляд **явища** з погляду фундаментальних законів відволікається від конкретних рис. Тому другий метод моделювання - теоретичний розгляд проблеми - дозволяє одержати найбільш загальний зв'язок між істотними для явища величинами і характеризує властивості, притаманні усім явищам даного класу.

При теоретичному методі дослідження не представляється можливим прогнозувати природний процес без знань конкретних значень коефіцієнтів моделі.

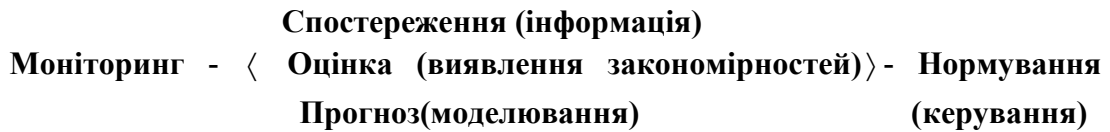
Отже, повинні розроблятися методи, що доповнюють експериментальне дослідження науково обґрунтованим методом узагальнення даного одиничного досвіду. Однак всі узагальнення на цій основі носять дуже наближений і приватний характер.

Стосовно до атмосфери **моделлю** поширення забруднювальних речовин може служити будь-яка алгоритмічна чи аналогова система, що дозволяє імітувати процеси розсіювання домішок в атмосферному повітрі.

Допустимо, нам необхідно одержати інформацію про просторову мінливість концентрації шкідливих речовин (ШР) у повітрі і по експериментальним даним скласти надійну карту забруднення атмосфери (ЗА). Для цього варто систематично проводити відбір проб у вузлах регулярної сітки з кроком 1-2 км (задача практично нездійсненна, фізично та фінансово затратна). Одним зі способів відновлення полів концентрації є методи математичного моделювання (ММ) процесів, де основою є реальні умови [5].

Таким чином, важливим елементом моделювання є якісна первинна інформація (її поставляє система моніторингу природних середовищ), що узагальнюється, аналізується. Моніторинг має 3 завдання: спостереження, оцінка стану (діагноз), прогноз наступного стану довкілля. Зв'язок

інформаційної й управлінської систем схематично можна зобразити так [5, 6]:



Важливого значення набувають методи ММ, які дозволяють більш досконально прогнозувати санітарний стан НС, розробляти оптимальні рекомендації з оздоровлення повітряного і водяного басейнів і ґрунтового середовища.

Для боротьби з ЗА можна використовувати комплекс заходів, серед яких: удосконалення технологій виробничих процесів і двигунів, герметизація устаткування, очищення димових і вентиляційних газів, розробка ефективних способів спалювання палива (газ), раціональне містобудування і т.д. Але знизити викиди до нуля неможливо. Тому велике значення мають розробки в області метеорологічних аспектів ЗА, що зв'язані насамперед із дослідженням атмосферної дифузії, вивченням закономірностей поширення домішок і особливостей їхнього просторово-тимчасового розподілу. Це основа для об'єктивної оцінки стану забруднення повітряного басейну і розробки можливих заходів щодо забезпечення чистоти атмосфери.

Самі характеристики ЗА зараз усі у більшому ступені розглядаються як метеорологічні елементи. Тому створення системи спостережень за ЗА й аналіз результатів стуляються з метеорологічними задачами. Звідси впливають задачі нормування ШР, прогноз ЗА і прогноз умов погоди, при яких можуть виникати небезпечні скупчення домішки в приземному шарі, задача глобального ЗА й ін.

Рішення зазначених задач має загальну основу з вивченням атмосферної дифузії, оскільки процеси переносу домішки в атмосфері визначаються, головним чином, законами вихрового перемішування. Чітко ця спільність виявляється при побудові теоретичних моделей явищ, заснованих на рішенні рівняння турбулентної дифузії при відповідних крайових умовах. В усіх випадках потрібно знання турбулентних характеристик і розподіл метеорологічних елементів, що визначають механізм обміну в атмосфері.

Таким чином, поширення шкідливих домішок в атмосфері на близькій й особливо далекій відстані, їхня трансформація (перетворення одних в інші), випадання з атмосфери в значній мірі залежить від метеорологічних

умов. Тому для розрахунку поширення домішок в атмосфері необхідно мати значення ряду метеорологічних параметрів (швидкість вітру, температура, вологість і т.д.). З іншого боку, домішки атмосфери роблять самі вплив на значення метеорологічних величин.

У зв'язку зі сказаним, задача розрахунку і прогнозу атмосферних домішок повинна вирішатись одночасно з задачею розрахунку і прогнозу метеорологічних величин. Ці дві задачі зважуються на основі рівняння балансу для атмосферних домішок і рівнянь гідротермодинаміки, що виражають основні закони фізики: збереження маси, кількості руху й енергії. У загальному виді ці закони виражаються у формі рівняння балансу [5, 7].

1.2 Рівняння балансу для будь-якої субстанції

Нехай a – кількість будь-якої субстанції (маси, енергії й ін.) в одиниці маси повітря, тобто питома концентрація субстанції [кг/кг, г/г, мг/мг].

V – замкнутий обсяг;

S^* – поверхня цього замкнутого обсягу;

dv – елемент обсягу;

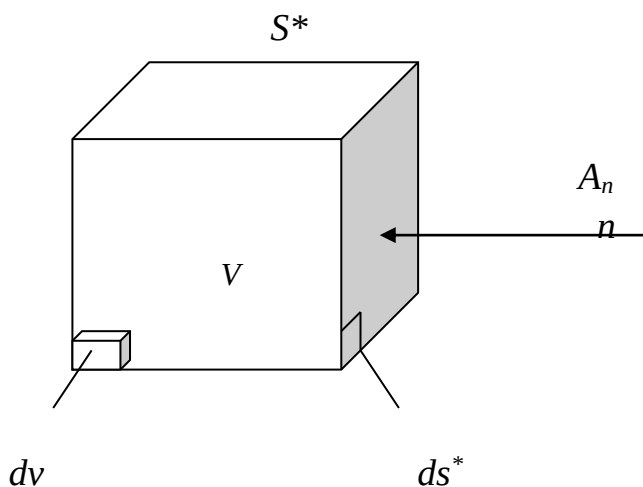
ds^* – елемент поверхні;

n – нормаль до поверхні;

A_n – швидкість руху субстанції по зовнішній нормалі до поверхні;

ε_a – приплив субстанції до одиниці об'єму (це може бути швидкість утворення або знищення субстанції);

ρ – щільність повітря.



Відповідно до основних законів фізики:

$$\iiint_V \frac{\partial \rho a}{\partial t} dv = - \iint_{S^*} \rho a A_n ds^* + \iiint_V \varepsilon_a dv, \quad (1.1)$$

де $\iiint_V \frac{\partial \rho a}{\partial t} dv$ - швидкість зміни кількості субстанції в обсязі V ;

$-\iint_{S^*} a \rho A_n ds^*$ - повний потік (адвекція) субстанції через поверхню S^* ;

$\iiint_V \varepsilon_a dv$ - приплив субстанції в обсязі за рахунок внутрішніх причин.

Відповідно до теореми Гаусса-Остроградського, між інтегралами по поверхні й обсягу існує наступне співвідношення

$$\iint_{S^*} B_n ds^* = \iiint_V \operatorname{div} B dv. \quad (1.2)$$

Тут B – вектор;

B_n – проекція вектора на зовнішню нормаль до поверхні.

$\operatorname{div} B$ – об'ємна дивергенція вектора B . У декартовій системі записується у вигляді:

$$\operatorname{div} B = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (1.3)$$

B_x, B_y, B_z – проекції вектора B на осі X, Y, Z .

div - це число, що характеризує зміну потоку векторного поля в даному місці.

Прийнявши $B_n = a \rho A_n$, а $B = a \rho A$, запишемо

$$\iiint_V \frac{\partial \rho a}{\partial t} dv = - \iiint_V \operatorname{div}(A \rho a) dv + \iiint_V \varepsilon_a dv \quad (1.4)$$

чи об'єднавши їх в один, одержимо

$$\iiint_V \left(\frac{\partial \rho a}{\partial t} + \operatorname{div}(a \rho A) - \varepsilon_a \right) dv = 0 \quad (1.5)$$

Оскільки це інтегральне співвідношення справедливе для будь-якого обсягу, то за умови безперервності і диференційності усіх вхідних функцій, вираженню (1.5) можна додати диференціальну форму:

$$\frac{\partial \rho a}{\partial t} + \operatorname{div}(a \rho A) = \varepsilon_a \quad (1.6)$$

Вираження (1.6) справедливо для ламінарного руху і являє собою рівняння балансу будь-якої субстанції (для ламінарного потоку). Для реальних середовищ, що практично завжди володіють у тім чи іншому ступені вираженою турбулентністю, необхідно перейти до рівняння балансу для осереднених величин. Розглянемо осереднення за часом.

Нехай будь-яка субстанція чи величина є $f=f(t)$ - функція часу, а її осереднене значення:

$$\bar{f}(t) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad (1.7)$$

де T – період осереднення (10-20 хвилин);

$\bar{f}$ - осереднене за часом значення субстанції.

Будь-яку величину f можна представити як:

$$f = \bar{f} + f' \quad (1.8)$$

де f' - деяка пульсація, відхилення величини від її середнього значення, обумовлене турбулентністю.

Для будь-яких субстанцій φ і f

$$\begin{aligned} \overline{\bar{f}} &= \bar{f}; & \overline{f'} &= 0; & \overline{(f + \varphi)} &= \bar{f} + \bar{\varphi}; \\ \overline{\operatorname{grad} f} &= \operatorname{grad} \bar{f}; & \overline{f \cdot \varphi} &= \bar{f} \cdot \bar{\varphi} + \overline{f' \cdot \varphi'} & \text{і т.д.} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Покладемо, що $a = \bar{a} + a'$; $A = \bar{A} + A'$; для щільності повітря приймемо $\rho = \bar{\rho}$, тому що мінливість щільності мала $\rho' = 0$.

Підставимо ці співвідношення в рівняння балансу, записане в диференціальній формі (1.6). Тоді за умови турбулентного перемішування маємо:

$$\frac{\partial \rho(\bar{a} + a')}{\partial t} + \text{div}(\rho[\bar{a} + a'] [\bar{A} + A']) = \varepsilon_a. \quad (1.10)$$

Зробимо осереднення. Тоді

$$\frac{\partial \rho \bar{a}}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{a} A) + \text{div}(\rho \overline{a' A'}) = \varepsilon_a. \quad (1.11)$$

Вираження (1.11) являє собою рівняння балансу для будь-якої субстанції. На його основі можна одержати рівняння балансу атмосферних домішок, а також рівняння гідротермодинаміки [7].

Питання для самоконтролю:

1. Яке місце належить “Моделюванню та прогнозуванню стану довкілля” у рядку інших дисциплін природоохоронного профілю?
2. Що ми розуміємо під поняттям «модель»?
3. У чому полягає фізичний смисл рівняння балансу для будь-якої субстанції?
4. Що таке питома концентрація субстанції?
5. Які методи досліджень застосовуються при вивченні різних фізичних явищ?
6. Як потрібно вирішувати задачу розрахунку і прогнозу атмосферних домішок?
7. Які закони фізики потрібно застосовувати при рішенні задачі розрахунку і прогнозу атмосферних домішок?

2 ВПЛИВ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ І СИНОПТИЧНИХ УМОВ НА ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ У МІСТІ

Досягнутий рівень розвитку промисловості, транспорту, сільського господарства неминуче веде, в тій чи іншій мірі, до забруднення природних середовищ. Найважливіше завдання - захист повітряного басейну від забруднення чи відвернення (запобігання) росту концентрації у період *несприятливих метеорологічних умов* (НМУ). Воно будується на розгляді блоку метеорологічних факторів, оскільки процеси розсіювання та нагромадження забруднювальних речовин (ЗР) визначаються, в основному, термодинамічним станом атмосфери. Облік розсіюючої здатності атмосфери потрібен для раціонального нормування викидів промислових об'єктів та оптимального підбору параметрів викидів з метою зберігання чистоти повітряного басейну.

2.1 Метеорологічні аспекти розсіювання домішок в атмосфері

Характер забруднення повітря в місцях викиду забруднювальних речовин, з одного боку, визначається наявністю великої кількості різних джерел викидів, з іншого боку, в атмосфері виникають ефекти перемішування багатьох викидів, розсіювання або накопичення шкідливих домішок, які визначаються метеорологічними умовами.

Задача моделювання процесів розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері і прогнозування стану рівня забруднення базується на урахуванні метеорологічних умов забруднення повітря.

Перенос і розсіювання домішок, що надходять в атмосферу, залежить від безлічі факторів і, у першу чергу, від термодинамічного стану пограничного шару атмосфери. Ці умови характеризуються режимом вітру, термічною стратифікацією повітря, наявністю ряду атмосферних явищ.

У залежності від типу джерела викиду, *швидкість вітру* може по-різному впливати на перенос шкідливих речовин. Відзначаються два максимуми концентрацій, що зв'язані з внеском двох груп джерел.

При штилі основний вклад у забруднення повітря вносять низькі викиди. Саме тому штильовий максимум найбільш виражено взимку,

коли внаслідок зниженого турбулентного обміну ослаблене розсіювання низьких і надходження в приземний шар високих викидів [1,3, 8].

Посилення другого максимуму (при швидкості вітру від 4 до 7 м/с) улітку зв'язано з конвективними умовами, які часто спостерігаються у цей період та при яких має місце інтенсивне надходження до землі викидів від високих джерел. Найбільші концентрації формуються біля поверхні землі при деякій швидкості U_m , що називають "небезпечною". Її значення залежать від типу джерел викиду і визначається для перегрітих джерел через параметр

$$v_m = 0.65 \sqrt[3]{\frac{V \Delta T}{H}} ; \quad (2.1)$$

де V (м³/с) - витрата газоповітряної суміші, яка розраховується по формулі

$$V = \frac{\pi D^2 \omega_0}{4} , \quad (2.2)$$

де D - діаметр устя джерела викиду, м;

ω_0 - середня швидкість виходу газоповітряної суміші з устя джерела викиду, м/с;

ΔT - різниця між температурою газоповітряної суміші T_r що викидається і температурою навколишнього атмосферного повітря T_b .

H - висота труби, м.

Значення небезпечної швидкості вітру U_m (м/с) на рівні флюгера (за звичай 10м від рівня землі) визначається для перегрітих викидів по формулах:

$$u_m = 0.5 \quad \text{при } v_m \leq 0.5; \quad (2.3)$$

$$u_m = v_m \quad \text{при } 0.5 < v_m \leq 2 ; \quad (2.4)$$

$$u_m = v_m \left(1 + 0.12 \sqrt{10000 \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta T}} \right) \quad \text{при } v_m > 2; \quad (2.5)$$

Для холодних викидів u_m розраховується через параметр

$$v'_m = 1.3 \frac{\omega_0 D}{H} ; \quad (2.6)$$

по формулах

$$u_m = 0.5 \quad \text{при} \quad v'_m \leq 0.5; \quad (2.7)$$

$$u_m = v'_m \quad \text{при} \quad 0.5 < v'_m \leq 2; \quad (2.8)$$

$$u_m = 2.2 v'_m \quad \text{при} \quad v'_m > 2. \quad (2.9)$$

Коли основний вклад вносять низькі джерела викидів, то підвищений рівень забруднення повітря в районі викиду відзначається при слабких вітрах (0-1 м/с) за рахунок накопичення домішок у приземному шарі. За даними, отриманими Берляндом М.Є. і Безуглою Е.Ю. [1,10], як правило концентрації домішок при вітрі швидкістю 0-1 м/с на 30-70% вище, ніж при інших швидкостях. Однак Сонькін Л.Р., Разбегаєва Е.А. і ін. знайшли два максимуми швидкості вітру, при яких відбувається зростання вмісту інгредієнтів в атмосфері [8]. Другий максимум (при швидкостях 3-6 м/с) Берлянд М.Є. пояснює викидами найбільш потужних високих джерел (рис. 2.1) [1].

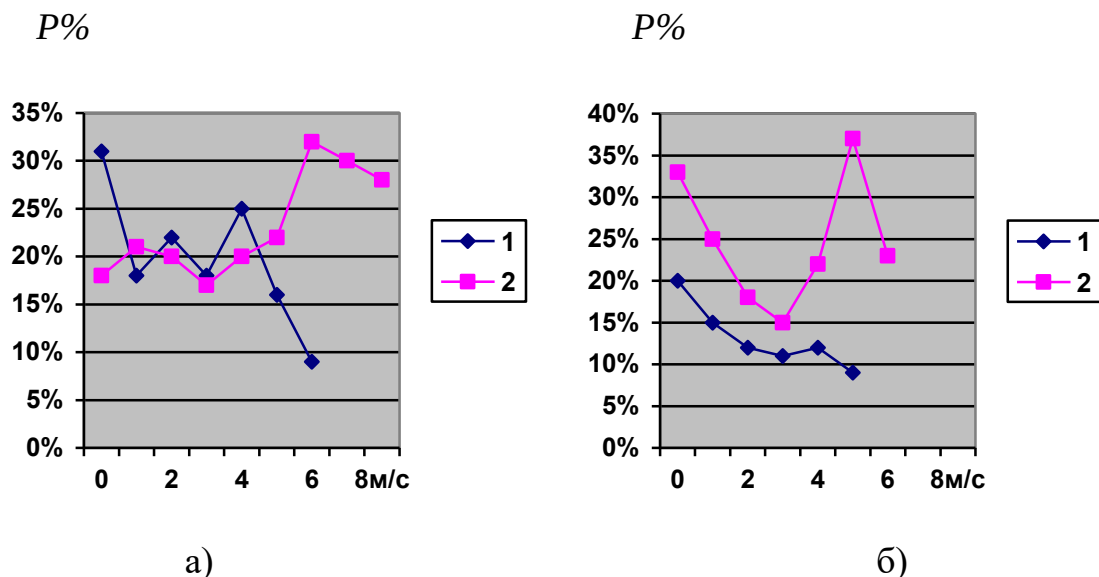


Рисунок 2.1 - Повторюваність $P(\%)$ підвищених концентрацій SO_2 (а) і пилу (б) при різних швидкостях вітру в холодний (1) і теплий (2) періоди [1]

Істотний вплив на рівень забруднення повітря в містах має **напрямок вітру**. Збільшення концентрацій домішок у місті з зосередженою промисловою площиною спостерігається тоді, коли відзначаються вітри з боку промислових об'єктів.

Однак бувають порушення зв'язку між напрямком вітру і ЗВ в районах, де розвинена місцева циркуляція. Спотворення повітряного

переносу обумовлюються не тільки складним рельєфом і водоймами, а й безпосереднім тепловим впливом великих промислових комплексів.

Зв'язок між змістом домішок в повітрі і напрямком вітру в деяких містах визначається специфічними місцевими особливостями. У містах витягнутої форми підвищене ЗВ створюється при вітрі вздовж великої осі за рахунок максимального накладення викидів від багатьох джерел.

Таким чином, вплив напрямку вітру на ЗВ в містах визначає цілий ряд факторів, а саме: розташування джерел викидів, рельєф, місцева циркуляція, вплив самих об'єктів на вітровий режим, а також взаємозв'язок зазначених факторів.

Вплив температури атмосферного повітря на ЗП неоднозначно. Взимку з низькими температурами часто пов'язані застійні ситуації, що викликають високий вміст домішок в ПБ міст. У той же час вихід активних зимових циклонів призводить до сильного підвищення температури і одночасно до очищення повітря від домішок. Тут велику роль відіграють атмосферні опади і посилення вітру в циклоні.

Виходячи з фізичного механізму поширення домішок в атмосфері, можна прояснити, як впливає термічний стан повітряної маси, що розташовується над містом, на ЗА. З підвищенням температури повітря зменшується висота підйому гарячих викидів і відповідно збільшуються концентрації домішок в приземному шарі атмосфери. Цей ефект особливо істотний для слабо перегрітих викидів. Такий характер впливу температури на рівень ЗА можна оцінити кількісно. Відомо, що максимальна концентрація, створювана одиночними джерелами з гарячими викидами, збільшується зі зменшенням перегріву вихідних газів по відношенню до навколишнього повітря $\Delta T = T_z - T_n$ (де T_z – температура вихідних газів; T_n – температура повітря).

Відомо, що значення максимальної концентрації обернено пропорційно кубічному кореню з ΔT (це буде далі підтверджено формулою (4.2))

$$S_m \approx \frac{const}{\sqrt[3]{T_a - \bar{O}_i}}. \quad (2.10)$$

Таким чином, вплив температури повітря на концентрації домішок буде тим більшим, чим менше перегрів вихідних газів. У ситуаціях застою повітря (при слабкому вітрі) найбільше скупчення домішок у приземному шарі відзначається при відносно підвищених температурах [8].

До основних факторів, що визначають розсіювання домішок, відноситься **стратифікація атмосфери**, у тому числі **інверсія температури** (підвищення температури повітря з висотою). Інверсії ослаблюють вертикальний обмін повітря. Якщо шар підвищеної інверсії розташовується безпосередньо над джерелом викидів, то в приземному шарі атмосфери створюються небезпечні умови забруднення, тому що інверсійний шар обмежує підйом викидів і сприяє їхньому накопиченню в приземному шарі. Якщо шар підвищеної інверсії розташовано на досить великій висоті від труб підприємств, то концентрація домішки буде істотно менше. Шар інверсії, розташований нижче рівня викидів, перешкоджає переносу їх до земної поверхні (рис.2.2). Вивчення питання про вплив інверсій на концентрацію шкідливих домішок в атмосфері промислових міст показало, що при наявності інверсійного шару домішок у повітрі на 10-60% більше, ніж при його відсутності [2, 3].

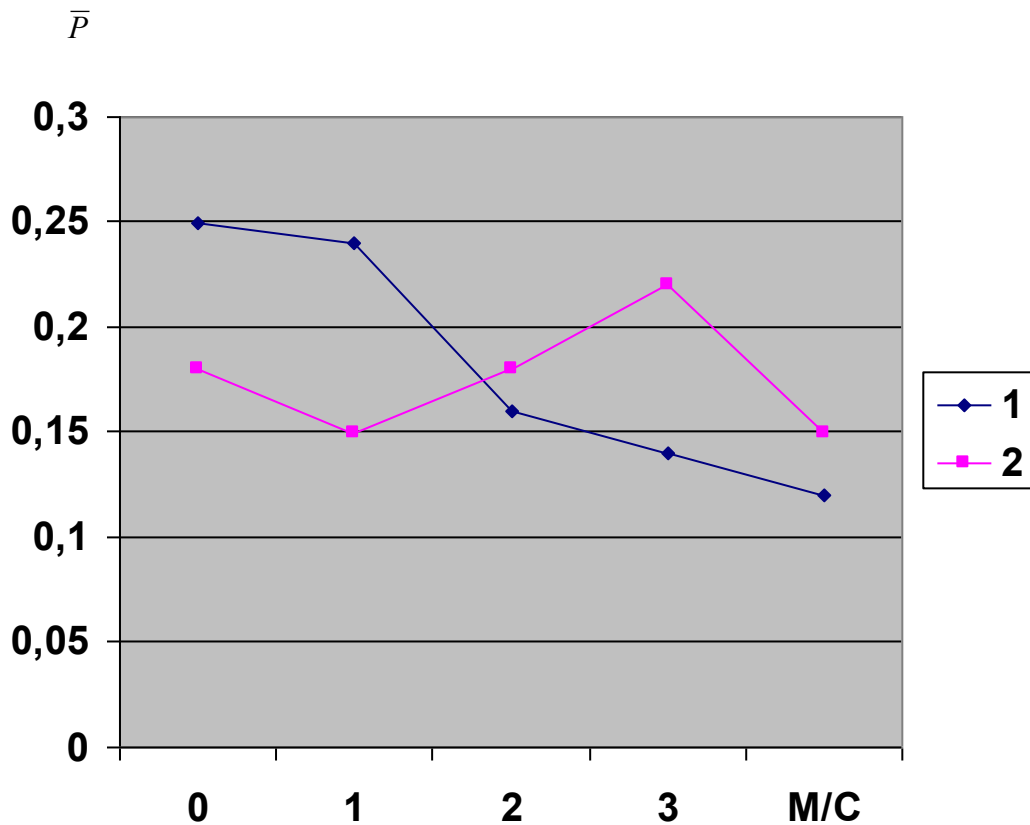


Рисунок 2.2 - Залежність рівня забруднення ($\bar{P}$) від швидкості вітру при наявності (1) і відсутності (2) приземної інверсії [3]

Треба відмітити, що вплив інверсійних шарів на важкі домішки (пил, сажа, сульфати й інші аерозолі) виявляється слабше, ніж на легкі, і зі збільшенням розміру часток цей вплив зменшується. Інверсії мають

більший вплив на холодні викиди внаслідок їх малого початкового підйому.

Зі слабкими швидкостями вітру і стійким станом атмосфери зв'язують епізоди значного забруднення повітря від низьких джерел. Таку ситуацію (приземна інверсія температури в поєднанні зі слабким вітром 0-1 м/с) прийнято називати "**застій повітря**". Умови застою звичайно зв'язані з великомасштабними атмосферними процесами, найчастіше з антициклонами, при яких у прикордонному шарі атмосфери спостерігаються слабкі вітри і формуються приземні радіаційні інверсії. Довідка про комплекс аномально небезпечних метеорологічних умов надана у табл. 4.1.

Поряд з антициклонічним типом синоптичних ситуацій, при якому звичайно відзначаються максимальні концентрації інгредієнтів, виділяють також циклонічне (теплий сектор) і проміжне поле (периферія циклонів і антициклонів) [8]. Розвиті циклони протягом усього року сприяють очищенню міського повітря від шкідливих домішок. Ефект підвищеного забруднення в стаціонарних антициклонах виявляється узимку значно більше, ніж улітку. Очевидно, це зв'язано з відсутністю в літню пору року потужних інверсій. Чим вище середній рівень забруднення повітря, тим більше небезпека високих значень концентрацій у стаціонарних антициклонах. Таким чином, умови застою більш небезпечні для міста з високим рівнем забруднення атмосфери.

На забруднення повітря також впливають **тумани, опади і радіаційний режим**. Факт очищення атмосфери від домішок опадами зазначається в ряді публікацій. Атмосферні домішки видозмінюються в процесі взаємодії з водяними краплями туманів, хмар, опадів. Домішки частково поглинаються водяними краплями, а при їхньому розчиненні іноді утворюються більш токсичні речовини. Гігроскопічні аерозолі, які мають електричний заряд з більшою швидкістю вимиваються з хмари, тому що волога осаджуючись на аерозолях тим самим збільшує їхні розміри і швидкість гравітаційного осадження.

Аналіз показує, що відновлення рівня забруднення повітря в місті після його очищення опадами відбувається протягом певного часу порядку декількох годин. Високі концентрації домішки в першу годину після закінчення випадання опадів рідко. У перші 12 годин після закінчення випадання повторюваність високих концентрацій нижче, ніж в наступні години і в середньому [1, 2, 8].

Опади призводять до зниження концентрацій домішок. Однак ефект вимивання спостерігається лише поза зоною прямого впливу джерел. Під факелом викидів рівень концентрації відновлюється майже відразу після припинення опадів.

У дні з опадами високі концентрації в значній мірі пов'язані з перенесенням викидів з боку джерел, а в дні з їх відсутністю - головним чином з умовами застою повітря.

Домішки видаляються з атмосфери не тільки опадами, але і хмарами за рахунок поглинання краплями або кристалами. У зв'язку з цим при низької хмарності поглинається приземна частину міської шапки і в кінцевому рахунку зменшується приземна концентрація домішок. З іншого боку, влітку в хмарну погоду ослаблений турбулентний обмін, в результаті чого може відзначатися підвищене забруднення повітря, обумовлене низьким викидами.

В туманах, так само як і в хмарах, відбувається поглинання домішок краплями. Однак ці домішки разом з краплями залишаються в приземному шарі повітря і надають не менше, ніж раніше, шкідливий вплив на здоров'я людей, рослини та ін. В той же час, за рахунок значних градієнтів концентрацій в повітрі відбувається перенос домішок в область туману з навколишнього простору, в тому числі з верхніх шарів. У зв'язку з цим сумарна концентрація домішок зростає. Значну небезпеку становлять розташовані над туманом факели диму, які опускаються в приземний шар повітря. Важливо також, що над туманом зазвичай утворюється піднесена інверсія температури. Отже, в туманах в нижньому шарі повітря створюється значне скупчення шкідливих речовин.

Всі представлені вище дані досить виразно свідчать про те, що тумани сприяють підвищенню забруднення приземного шару атмосфери в містах. У зв'язку з цим взимку додаткову небезпеку становлять розташовані в районі міст незамерзаючі водойми, поблизу яких часто виникають тумани.

Оскільки значна частина домішок в туманах поглинається і знаходиться не в повітрі, а в краплях або кристалах, то часто не вдається виміряти їх концентрації. Несприятливі умови в туманах в ряді випадків фіксуються по відчуттю, візуально, а також із запахів.

Відмінність дифузії домішки при опадах, у порівнянні з туманами і хмарами, в основному, обумовлена більш великим розміром крапель і тому їхнім більш швидким випадінням. Найбільш інтенсивне вимивання

елементів відбувається при випаданні перших 3-4 мм опадів, далі значного зменшення концентрації не відзначається. Зливові опади очищають повітря сильніше, ніж обложні. Опади, що випадають у виді снігу, у 3-4 рази ефективніше вимивають аерозолі, чим дощ, що обумовлено великою поверхнею сніжинок і меншою швидкістю їхнього падіння. Так, при одній і тій же інтенсивності опадів у сніговій воді сульфатів і нітратів міститься в кілька разів більше, ніж у дощовий. Таким чином, опади зменшують фонове забруднення повітря в місті, що є результатом сумарної дії всіх джерел домішок.

Сонячна радіація обумовлює фотохімічні реакції в атмосфері чим сприяє формуванню різних вторинних продуктів, яким властиві часто більш токсичні якості, чим тим речовинам, що надходили від джерел викидів. Так, у процесі фотохімічних реакцій в атмосфері відбувається окислювання сірчистого газу з утворенням сульфатних аерозолів. У результаті фотохімічного ефекту в ясні сонячні дні в забрудненому повітрі формується фотохімічний смог [2, 8].

2.2 Вплив мікрометеорологічних умов у місті на формування рівня забруднення атмосфери

Питання прогнозування та запобігання високих рівнів забруднення повітря представляють найбільший інтерес в умовах міст. Характер забруднення повітря в місті, з одного боку, визначається наявністю на його території великої кількості різних джерел викидів. З іншого боку, в місті виникають якісно нові ефекти, які визначаються мікрокліматичними умовами, перемішуванням багатьох викидів, характером забудови.

Головні особливості поширення домішок від окремих об'єктів, розташованих в містах, в цілому близькі до тих, що і за їх межами, і підкоряються відомим фізичним закономірностям. У той же час в місті на обмеженій території в атмосферу надходять викиди з безлічі самих різних джерел, що істотно розрізняються за своїми властивостями. Потрапляючи в атмосферу домішки перемішуються, в зв'язку з чим значні концентрації домішок можуть спостерігатися в районах, де відсутній прямий вплив джерел викидів. На характер поширення в місті домішок, що надходять в атмосферу, роблять істотний вплив локальні зміни метеорологічних умов: підвищення температури щодо околиць, міська циркуляція повітря,

руйнування нижньої частини приземних інверсій і формування піднятих, ослаблення вітру в приземному шарі і ін.

Мікрометеорологічні умови (ММУ) у місті істотно впливають на характер рівня забруднення атмосфери (РЗА) і найчастіше сприяють росту концентрацій ЗР. Урахування ММУ необхідне при аналізі впливу метеофакторів на ЗА і при розробці методів прогнозу ЗА.

Установлено, що температура повітря в місті вище, ніж у заміських районах (середньорічна температура вище на 0,5-1,5⁰С, а при штилі і низькому фоні температур – на 10⁰С і більше). З «островом тепла» (ОТ) пов'язаний ряд ММУ в місті.

У середньому існує тенденція до утворення ОТ у центрі міста, але реально існують причини його зсуву до районів щільної забудови, які не завжди збігаються з центром. Відомо, що верхня границя ОТ знаходиться приблизно на 100 м від поверхні землі. Однак у Запоріжжі в денній час існує піднесений ОТ на висоті 100-200 м, зв'язаний з гарячими викидами і нагріванням домішок сонячною радіацією.

Формування ОТ визначає виникнення міської циркуляції від більш холодних окраїн до відносно теплої центральної частини. Поле вітрових потоків складне через перепад температури поверхні, що підстилає, а швидкість приблизно 1-2 м/с. Місцева циркуляція може бути помітна, коли загальний перенос малий.

Потік повітря в місті значно спотворюється будівлями. Відомо, що швидкість вітру в міських районах нижче, ніж в околицях, у середньому на 25-30%, а в місцях із щільною забудовою – у кілька разів. У той же час на деякій висоті (200-300 м) у міських районах відзначається згущення ліній потоку і посилення вітру в порівнянні з заміськими районами. Така система потоків приводить до збільшення концентрації за рахунок викидів високих джерел, оскільки при малих градієнтах тиску швидкість вітру на рівні викидів може наближатися до небезпечної, а біля землі вітер практично відсутній. Таким чином, створюється несприятлива ситуація, що характеризується штилем у нижньому шарі повітря і небезпечною швидкістю на висоті викидів. Поряд з цим зростає поривчастість вітру, турбулентний обмін і надходження домішок зверху до земної поверхні.

Підвищений турбулентний обмін у місті, у порівнянні з заміськими районами, виявлений американцями за допомогою трасерів до рівня, що перевищує висоту будинків у 2,5 разів.

У місті помітно змінюється не тільки швидкість, але і напрямок вітру (у середньому на 30° і більше). У деяких місцях напрямок вітру виявився навіть протилежним основному переносу. Але викиди, які здійснюються великими об'єктами з високих труб, не тільки переносяться загальним потоком, але й опускаються внаслідок збільшення турбулентного обміну. Складна міська циркуляція впливає на низькі викиди і дим, що доходить до рівня будинків. При цьому підсилюється перемішування різних викидів і вирівнювання поля концентрацій.

Найбільш значні зміни повітряного потоку відбуваються поблизу великих промислових об'єктів: над підприємством виникають висхідні потоки повітря, а в околицях – спадні.

У містах, розташованих у горах або на березі моря, на систему потоків накладається горно-долинна і бризова циркуляція. При розвитку горно-долинного вітру з міста в гори переноситься «шапка» забрудненого повітря (спочатку верхня частина, за нею нижня частина по типу теплового фронту). У багатьох випадках вплив міста підсилює місцеву циркуляцію повітря. Так, над містом денний бриз розвинутий сильніше, ніж за його межами. Виявляється повернення один раз винесеного з міста ЗР, унаслідок замкнутої бризової циркуляції.

Підвищення температури і збільшення турбулентного обміну приводить до руйнування в місті приземних і утворюванню піднесених інверсій.

Таким чином, коли за містом приземна інверсія, то в місті внизу, як правило, створюється шар у 100-300 м підвищеного обміну, а при дуже могутніх приземних інверсіях – товщина шару підвищеного обміну зменшується до 50-100 м. Під піднесеною інверсією розташовується основна частина міської шапки ЗР. При руйнуванні нижньої границі приземної інверсії в місті зростає надходження в приземний шар домішок від високих джерел і розсіювання низьких викидів [5, 8].

Мікрометеорологічні умови в місті впливають на процес формування туманів. З одного боку, підвищене надходження в атмосферу вологи і ядер конденсації створює передумови до збільшення туманів у місті, у порівнянні з околицею. Але з іншого боку, утворювання міського ОТ, особливо під час застою повітря, тобто коли туман найбільш ймовірний, приводить до зниження відносної вологості в приземному шарі, а отже до розсіювання туману. Характер впливу міста на утворення туману залежить від того, який з факторів переважає. Звідси протиріччя в літературі по

цьому питанню. У місті туман завжди менше, ніж за містом. Але в районі нафтохімічних виробництв повторюваність туманів вище.

Наявність туману призводить до того, що в його краплях концентруються не тільки домішки, які знаходяться поблизу підстилаючої поверхні, але і ті, які містяться у вище розташованих шарах повітря внаслідок збільшення дифузійного потоку домішки зверху вниз. Краплі туману як би акумулюють домішки зі значного шару атмосфери, що істотно збільшує забруднення повітря поблизу підстилаючої поверхні, та сприяє очищенню вище розташованих шарів атмосфери. Так, за даними спостережень у ряді міст, середня концентрація домішок під час туману на 40-110% вище, ніж до його утворення [1]. У багатьох промислових центрах відзначається збільшення повторюваності туманів, що в значній мірі обумовлено посиленням антропогенного навантаження. При цьому розчинення сірчистого газу в краплях туману приводить до утворення більш токсичної сірчаної кислоти.

Можна зробити висновок, що небезпека формування високих концентрацій ЗР у приземному шарі повітря викидами поодиноких, великих джерел звичайно зростає внаслідок ММУ міста:

а) підвищена повторюваність піднесених інверсій приводить до збільшення частоти утворення високих концентрацій домішок у повітрі;

б) посилення турбулентного обміну внаслідок значної шорсткості поверхні, що підстилає, а також руйнування нижньої частини інверсії сприяють збільшенню надходження викидів зверху в приземний шар повітря;

в) сполучення підвищеної повторюваності штилів у землі і швидкості вітру, близької до небезпечної, на рівні 100-200 м (особливо в районах із щільною забудовою) зростає імовірність виникнення несприятливої ситуації.

Особливості ММУ в місті, що приводять до підвищення концентрації в приземному шарі, збільшують і процес перемішування домішок і утворюють фонову концентрацію. Утворення фонових і локальних концентрацій та їхньої зміни під впливом метеорологічних умов - процеси різних масштабів. Локальна концентрація визначається ММУ міста, а фонові - загальною метеорологічною і синоптичною обстановкою, тобто умов не залежних від самого міста.

2.3 Вплив синоптичних умов на забруднення атмосфери

Відомо, що залежності між вмістом домішок у міському повітрі та метеорологічними параметрами складні і неоднозначні. Вони визначаються комплексом параметрів. Між тим синоптична ситуація являє собою складний комплекс метеорологічних та аерологічних характеристик, відображує різноманіття процесів, які відбуваються в атмосфері.

Для аналізу впливу синоптичної ситуації потрібно визначитися з основними поняттями та термінологією, прийнятою у синоптичній метеорології.

Повітряні маси - великі обсяги повітря в нижній частині земної атмосфери - тропосфері, мають горизонтальні розміри в багато сотень або кілька тисяч кілометрів і вертикальні розміри в кілька кілометрів, що характеризуються приблизною однорідністю температури і вологовмісту по горизонталі. Однорідність властивостей повітряної маси досягається формуванням її над однорідної підстильної поверхнею в подібних умовах теплового і радіаційного балансу [10].

Крім того, необхідні такі циркуляційні умови, при яких повітряна маса тривалий час циркулювала б в регіоні формування. Значення метеорологічних елементів в межах повітряної маси змінюються незначно - горизонтальні градієнти малі. Різке зростання градієнтів метеорологічних величин, або, принаймні, зміна розміру й напрямки градієнтів відбуваються в перехідній зоні між двома повітряними масами - зоні атмосферного фронту.

Повітряні маси ділять на холодні, теплі і місцеві. Теплою (холодною) називають повітряну масу, яка тепліше (холодніше) навколишнього її середовища і в даному районі поступово охолоджується (нагрівається), прагнучи наблизитися до теплового рівноваги. Під навколишнім середовищем тут розуміється характер підстильної поверхні, її тепловий стан, а також сусідні повітряні маси. Місцевою (нейтральною) повітряною масою називають масу, що знаходиться в тепловій рівновазі зі своїм середовищем, тобто день за днем зберігає свої властивості без істотних змін.

Повітряні маси формуються над різними ділянками Землі, що призводить до особливостей в їх властивості. Якщо маса утворюється над Арктикою, то, відповідно, вона буде називатися арктичною, а її повітря

дуже холодне і може принести густі тумани або легкий серпанок. Полярне повітря своїм родовищем вважає помірні широти. Його властивості можуть змінюватися в залежності від пори року. Взимку полярні маси мало чим відрізняються від арктичних, а ось влітку таке повітря може принести дуже погану видимість.

Тропічні маси, що прийшли з тропіків і субтропіків, мають високу температуру і підвищену запиленість. Тропічні маси, сформовані на континентальній частині тропічного поясу, призводять до пилових вихорів, бур і смерчів. Екваторіальне повітря дуже схоже на тропічне, але все його властивості більш виражені.

Атмосферні фронти. Якщо дві повітряні маси, що володіють різною температурою, зустрічаються, утворюється таке явище, як фронт, або поверхня розділу. За характером руху фронти ділять на стаціонарні і рухливі (рис. 2. 3).

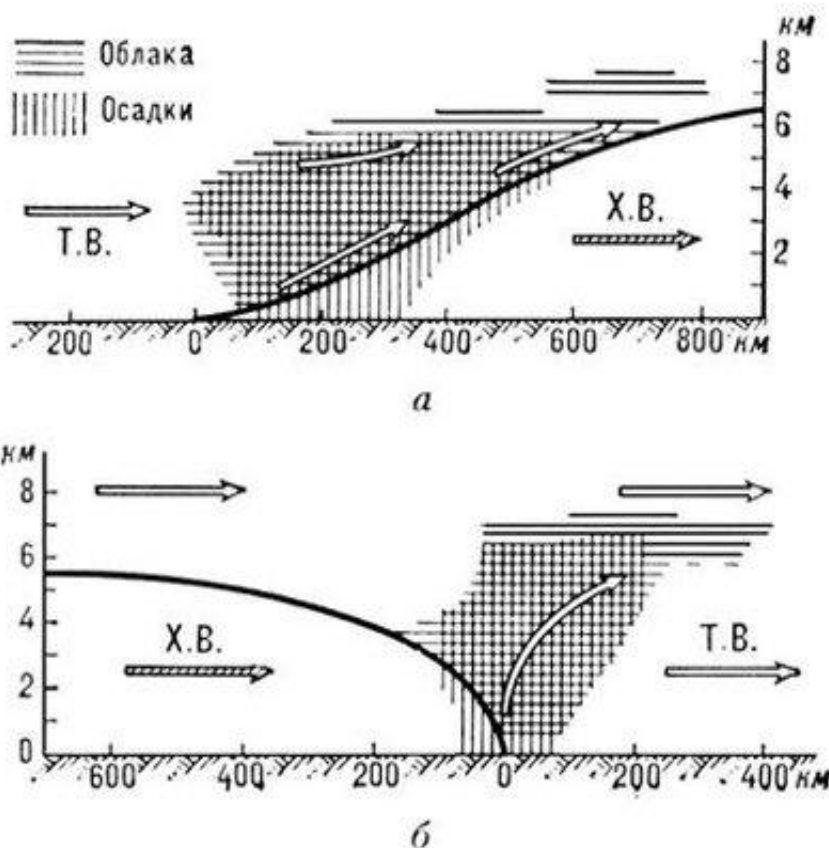


Рисунок 2.3 - Формування атмосферних фронтів: а - теплого і б- холодного [10]

Кожен існуючий фронт розділяє між собою повітряні маси. Наприклад, головний полярний фронт є уявним посередником між

полярним і тропічним повітрям, головний арктичний - між арктичним і полярним, і так далі .

Якщо тепла повітряна маса наповзає на холодну, виникає теплий фронт. Він може передвіщати або проливний дощ, або сніг, який значно знизить видимість. Коли ж холодне повітря вклинюється під теплий, спостерігається утворення холодного фронту, який часто супроводжується шквалами, зливами, грозами.

Буває так, що повітряні маси не стикаються, а наздоганяють одна одну. У таких випадках утворюється фронт оклюзії. Якщо роль наздоганяючої виконує холодна маса, то називають таке явище фронтом холодної оклюзії, якщо ж навпаки, то фронтом теплою оклюзії. Ці фронти несуть зливову погоду з сильними поривами вітру.

З атмосферними фронтами пов'язаний розвиток циклонів і антициклонів (рис. 2.4).

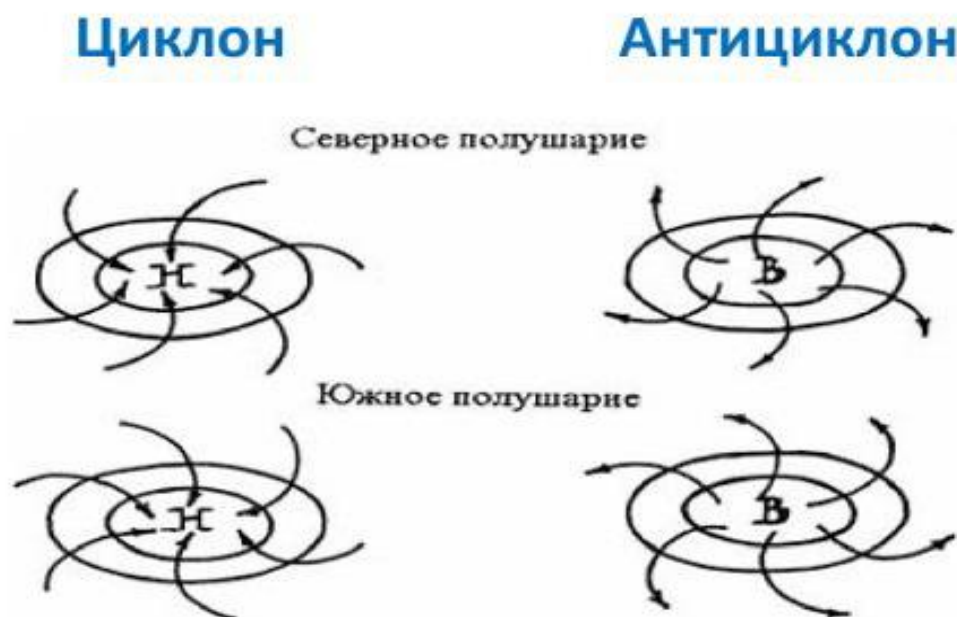


Рисунок 2.4 - Напрямок обертання циклонів та антициклонів у Північній та Південній півкулі

Циклон - це атмосферний вихор з низьким тиском в центрі. Його породжують два повітряні потоки, які мають різну температуру. Дуже сприятливі умови для їх утворення створюються в фронтах. В циклоні повітря рухається від його країв, де тиск вищий, до центру з низьким тиском. У центрі повітря нібито викидається вгору, що дає можливість

утворення висхідних потоків. У Північній півкулі напрямок руху вихору проти годинникової стрілки, в Південній півкулі збігається з рухом годинникової стрілки. Циклони провокують такі погодні явища, як скупчення хмарних мас, сильні опади, вітер і перепади температури.

Область підвищеного тиску в атмосфері з максимумом в центрі - це **антициклон**. Тиск на його краях більш низький, що дозволяє повітряю спрямовуватися від центру до периферії. Повітря, що знаходиться в центрі, постійно спускається і розходить до країв антициклону. Так утворюються низхідні потоки. Антициклон є протилежністю циклону ще й тому, що в Північній півкулі цей атмосферний вихор обертається за годинниковою стрілкою, в Південному - йде проти неї. Відмінності циклонів і антициклонів наведені у таблиці 2.2.

Цікавою властивістю антициклонів помірних широт є те, що вони як би переслідують циклони. В такому випадку малорухливий стан цілком характеризує антициклон. Погода, утворена цим вихором, малохмарна і суха. Вітру практично не спостерігається.

Синоптичні ситуації успішно прогнозуються існуючими методами. Але фізична оцінка ситуацій та зв'язаних з ними забруднень складна внаслідок великої мінливості, а іноді нечіткої виразності синоптичної ситуації. Іноді при схожих синоптичних ситуаціях можуть спостерігатися різноманітні погодні умови, які визначають рівень забруднення атмосфери (РЗА). Тому зупинимось на більш характерних.

Підвищене ЗА відмічається в антициклонах як в тепле, так і в холодне півріччя (в холодне більше). При циклонічній ситуації міське повітря більш-менш чисте, що пов'язане з опадами та посиленням вітру.

При наявності прогнозу позитивних аномалій тиску на місяць існує імовірність підвищення РЗА. Але фактичні матеріали показують, що антициклон не завжди визначає великий вміст домішок у міському повітрі. Найбільший РЗ у приземному шарі атмосфери відмічається у стаціонарному антициклоні та малорухомих гребнях, які являються високими і теплими баричними утвореннями. До останніх були віднесені антициклони та гребні, які рухаються зі швидкістю менш ніж 30 км за годину.

Ефект ВРЗА в стаціонарних антициклонах взимку більший, ніж влітку (для пилу більший, ніж для діоксиду сірки). Чим вищий середній РЗА, тим більше перевищення цього рівня в стаціонарних антициклонах.

Таблиця 2.2 - Відмінності циклонів і антициклонів

<i>№</i>	<i>Характеристика</i>	<i>Циклон</i>	<i>Антициклон</i>
1	Розміри	300-5000 км в діаметрі	Може досягати 4000 км в діаметрі
2	Швидкість переміщення	Постійна, від 30 до 60 км/год	Від 20 до 40 км/год (крім малорухомих)
3	Місця виникнення	Скрізь, частіше над океаном, крім екватора	Найчастіше в тропіках, над океаном і над льодом
4	Умови виникнення	При вторгненні теплого повітря в холодне	При вторгненні холодного повітря
5	Причини виникнення	Через природне обертання Землі (сила Коріоліса), при дефіциті маси повітря	Через виникнення циклону, при надлишку маси повітря.
6	Тиск	У центрі знижений, на краях високий.	У центрі підвищений, на краях низький
7	Напрямок обертання	У Південній півкулі - за годинниковою стрілкою, в Північній - проти неї.	У Південній півкулі - проти годинникової стрілки, в Північній - за годинниковою стрілкою.
8	Вертикальні рухи в центрі	Висхідні	Спадні
9	Позначення на картах	Літерою Н (L)	Літерою В (H)
10	Погода	Похмура, сильний вітер, безліч опадів. Зменшує спеку влітку і холод взимку	Ясна або малохмарна, стійка. Вітру і опадів немає. Влітку тепла, взимку морозна

Антициклони та гребні, що швидко рухаються, не визначають ВРЗА. Забруднення повітря у місті знижується при проходженні холодних фронтів, за винятком концентрацій, які утворюються високими джерелами з гарячими викидами.

Максимальний ВРЗА спостерігається в малорухомих антициклонах, яким відповідає область тепла в тропосфері. Холодні антициклони рухаються швидко. Наряду з цим РЗА в антициклонах визначається приземною температурою повітря. Чим вище температура, тим ЗП повинно бути вище. Отже РЗА вищий в теплих частинах антициклонах, зазвичай у північній та західній периферії антициклону. Зазвичай це отрог сибірського антициклону.

Підвищене ЗП може відмічатися у малоградієнтних баричних полях особливо в районах баричної сідловини і в розмитих циклонах. Іноді в теплих секторах циклонів. Є відомості про підвищенні концентрації домішок в зоні теплих фронтів. Ріст концентрацій двооксиду сірки та двооксиду азоту відмічається при проходженні фронту, який пов'язаний з морським бризом, що визначається утворенням низько розташованої піднесеної інверсії в денний час.

В проміжних полях при інших рівних умовах з антициклонічним вигином ізобар зв'язане більш високе ЗП, а з циклонічним вигином - менш високе ЗП, ніж з прямолінійними ізобарами.

Таким чином, утворенню підвищеного РЗА у міському повітрі сприяють: безградієнтне поле; антициклонічна крива ізобар; тепла повітряна маса; адвекція тепла в тропосфері.

У конкретних містах, в залежності від регіону, характеру синоптичних процесів, властивостей викидів, розташування джерел та інших факторів, мають бути виявлені інші особливості впливу синоптичних умов на ЗП [8, 10].

Питання для самоконтролю:

1. Як впливає напрям та швидкість вітру на забруднення атмосфери у місті?
2. Які особливості впливу на рівень забруднення атмосфери її термічної стійкості та умов застою повітря?
3. Як впливає температура повітря на рівень забруднення атмосфери?
4. Як впливають опади, хмари, тумани на рівень забруднення атмосфери?
5. У чому полягає фізичний смисл інерційного фактору?

6. У чому полягає вплив мікрометеорологічних умов у місті на формування рівня забруднення.
7. Де розміщується острів тепла у місті?
8. Що таке синоптична ситуація?
9. Які синоптичні умови сприяють формуванню високого рівня забруднення повітря у місті та регіонах?
10. Як атмосферні фронти впливають на рівень забруднення атмосфери?

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ДОМІШОК В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ

3.1 Рівняння балансу атмосферних домішок

Базуючись на рівнянні балансу для будь-якої субстанції (1.11), виведемо рівняння балансу атмосферних домішок. Як субстанцію a приймемо питому концентрацію атмосферної домішки. Швидкість руху A домішки в атмосфері представимо у виді

$$A = U + U_a, \quad (3.1)$$

Де U – швидкість повітря;

U_a - власна швидкість домішки щодо нерухомого повітря. Вона може бути обумовлена силою Архімеда, а також імпульсом, що даний домішці в результаті емісії.

Грунтуючись на представленнях про атмосферну дифузію, можна записати

$$U = \bar{U} + U', \quad (3.2)$$

де $\bar{U}$ - середня швидкість;

U' - пульсація, обумовлена турбулентністю руху.

Для власної швидкості руху домішки

$$U_a = \bar{U}_a, \quad U'_a = 0. \quad (3.3)$$

У більшому ступені це припущення справедливе для важких домішок, ніж для легких, тобто для тих, щільність яких більше щільності повітря.

Виходячи з сказаного, рівняння балансу (1.11) прийме вид:

$$\frac{\partial \bar{\rho a}}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho a} \bar{U}) + \text{div}(\bar{\rho a} U_a) + \text{div}(\bar{\rho a} U') = \varepsilon_a. \quad (3.4)$$

Введемо в розгляд об'ємну концентрацію домішки: $S = \rho a$ і турбулентний потік домішки $\overline{\rho a' U'} = \overline{s' U'} = Q_a$. Турбулентний потік домішки – це перенос маси домішки турбулентними часточками за одиницю часу через одиничну перпендикулярну поверхню $[Q_a] = \text{кг/м}^2\text{с}$.

Врахуємо співвідношення векторного аналізу

$$\operatorname{div}(SU) = U \operatorname{grad} S + S \operatorname{div} U, \quad (3.5)$$

$$U \operatorname{grad} S = u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z}$$

u, v, w - проекції вектору U .

Прийmemo, що $\operatorname{div} U = 0$, оскільки повітря практично нестискаємо. Рівняння балансу прийме вид (знак осереднення далі опускаємо):

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} + \operatorname{div}(S U_a) + \operatorname{div} Q_a = \varepsilon_a. \quad (3.6)$$

Виразимо турбулентний потік домішки через осередненні величини. На основі напівемпіричної теорії турбулентності можна прийняти, що

$$Q_a = \overline{\rho a' U'} = -\rho K \operatorname{grad}(a), \quad (3.7)$$

де

$$K = [k_{ij}] = \begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{vmatrix}, \quad \begin{matrix} i = \overline{1;3} \\ j = \overline{1;3} \end{matrix} \quad (3.8)$$

тензор, тобто величина особливого роду, що задається числами і законами їхнього перетворення.

Буквою K позначимо коефіцієнт турбулентної в'язкості, а індекси i, j при значенні 1; 2; 3 відповідають осям X, Y, Z .

Відомо, що повна похідна це

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z}.$$

Тоді (3.6) можна переписати

$$\frac{dS}{dt} + \frac{\partial S u_a}{\partial x} + \frac{\partial S v_a}{\partial y} + \frac{\partial S w_a}{\partial z} - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k_{ij} \frac{\partial a}{\partial x_j}) = \xi_a, \quad (3.9)$$

u_a, v_a, w_a - проекції вектора U_a .

Прийmemo, що головні осі координат тензора збігаються з осями використовуваної декартової системи координат. У цьому випадку

$$k_{xy} = k_{xz} = k_{yx} = k_{yz} = k_{zx} = k_{zy} = 0.$$

Позначимо

$$k_{xy} = k_x; k_{yy} = k_y; k_{zz} = k_z$$

і врахуємо, що щільність повітря мало міняється по координатах (у порівнянні з іншими перемінними). Тоді рівняння балансу атмосферних домішок прийме вид:

$$\frac{dS}{dt} + \left(\frac{\partial S u_a}{\partial x} + \frac{\partial S v_a}{\partial y} + \frac{\partial S \omega_a}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial S}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) = \varepsilon_a. \quad (3.10)$$

$\frac{dS}{dt}$ - характеризує зміну концентрації домішки за рахунок швидкості переміщення повітря.

Член рівняння в першій дужці

$$\left(\frac{\partial S u_a}{\partial x} + \frac{\partial S v_a}{\partial y} + \frac{\partial S \omega_a}{\partial z} \right) = \text{div}(S U_a) = -D \quad (3.11)$$

визначає внесок у зміну концентрації домішки в рухомому обсязі повітря дивергенції потоку домішки, обумовленого власною швидкістю домішки U_a . У випадку, якщо первісна швидкість домішки від джерела U_a мала, і домішка має щільність повітря («невагома» домішка), то $D=0$. У випадку ж «важкої чи легкої перегрітій» домішки $\omega_a \neq 0$. Тоді, зневажаючи первісною швидкістю домішки від джерела, тобто думаючи, що $u_a = v_a = 0$, одержуємо

$$D = - \frac{\partial S \omega_a}{\partial z} = -S \frac{\partial \omega_a}{\partial z} - \omega_a \frac{\partial S}{\partial z}.$$

З цього вираження випливає, що у випадку $\omega_a \neq 0$, на зміну концентрації домішки впливають вертикальні градієнти як концентрації домішки, так і вертикальної швидкості домішки ω_a .

Член, що стоїть в рівнянні (3.10) у другій дужці

$$\frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial S}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial S}{\partial z} = L \quad (3.12)$$

описує вплив турбулентної дифузії на зміну концентрації домішки.

Перейдемо до аналізу припливів домішки, тобто розглянемо величину ε_a . Припливи домішки можуть мати різні джерела і походження.

Як в атмосфері, так і особливо на земній поверхні можуть існувати самі різні джерела домішки. Нехай розподіл цих джерел у просторі і часі є відомою функцією

$$F = F(x, y, z, t).$$

Кожна з домішок, що знаходяться в атмосфері, може вступати в хімічні реакції з іншими домішками чи частками повітря. У результаті цього може утворитися нова домішка чи ж відбутися її зникнення. У цьому випадку ми будемо мати джерело домішки P (як наслідок фізико-хімічних процесів в атмосфері) чи її стік, що позначимо R .

Частина домішок може «захоплюватися» вологою і «вимиватися» з атмосфери опадами. Цю частину домішки позначимо W .

Таким чином, повний приплив домішки можна записати

$$\varepsilon_a = F + P - R - W. \quad (3.13)$$

З огляду на все сказане, найбільш повний вид рівняння балансу атмосферних домішок у турбулентному середовищі наступний

$$\frac{dS}{dt} + \left(\frac{\partial S u_a}{\partial x} + \frac{\partial S v_a}{\partial y} + \frac{\partial S \omega_a}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial S}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) = F + P - R - W. \quad (3.14)$$

3.2 Початкові і граничні умови

З огляду на вираження для повної похідної

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + \omega \frac{\partial S}{\partial z},$$

і думаючи $u_a = v_a = 0$, перепишемо рівняння балансу атмосферних домішок

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + \omega \frac{\partial S}{\partial z} + \frac{\partial S \omega_a}{\partial z} - \left(\frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial S}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) = F + P - R - W. \quad (3.15)$$

Будемо вважати, що власна вертикальна швидкість домішки ω_a і приплив домішки ε_a відомі

$$\omega_a = \omega_a(x, y, z, t); \quad \varepsilon_a = \varepsilon_a(x, y, z, t).$$

Тоді рівняння (3.15) містить 7 невідомих перемінних :

$$S, u, v, \omega, k_x, k_y, k_z.$$

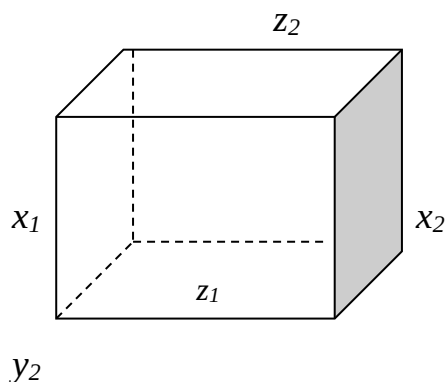
Шість з них крім S можна визначити шляхом рішення чисельної моделі атмосфери. Тоді рівняння (3.15) буде містити лише одну перемінну – S . Оскільки рівняння має лише одну першу похідну за часом, то необхідно задати одну початкову умову:

$$t = t_0, \quad S = S_0(x, y, z), \quad (3.16)$$

де $S_0(x, y, z)$ – відома функція координат.

Іншими словами, у момент часу t_0 розподіл концентрації домішки S у просторі відомий.

Рівняння (3.15) містить другі похідні по всім трьох координатах. Отже, для його рішення необхідно задати по дві граничних умови для всіх трьох координатах. Для простоти будемо вважати, що рішення рівняння (3.15) шукаємо в прямокутній області з нижньою і верхньою границями, що є горизонтальними площинами $z=z_1$, $z=z_2$. У якості нижньої границі може виступати підстилаюча поверхня [$z_1 = 0$], а верхньої - умовна верхня границя, яку позначимо [$z_2 = H$] чи [$z_2 \rightarrow \infty$].



Бічні границі області розрахунку приймемо як вертикальні площини

$$\begin{aligned}x &= x_1, \quad x = x_2, \\y &= y_1, \quad y = y_2.\end{aligned}$$

В окремому випадку може бути розглянута нескінченна область, тобто $x \rightarrow \pm\infty$; $y \rightarrow \pm\infty$.

При обмеженій області граничні умови в самому загальному виді можна записати:

$$\begin{cases} x = x_1 & S = S_{x1} \\ x = x_2 & S = S_{x2} \end{cases} \quad \begin{cases} y = y_1 & S = S_{y1} \\ y = y_2 & S = S_{y2} \end{cases} \quad \begin{cases} z = z_1 & S = S_{z1} \\ z = z_2 & S = S_{z2} \end{cases} \quad (3.17)$$

Зміст цих граничних умов полягає в тім, що на кожній із границь значення шуканої функції задаються.

У випадку необмеженої області розрахунку часто задається звертання шуканої функції в нуль при безмежному віддаленні від початку координат. Це виражається за допомогою умов

$$\begin{aligned}x &\rightarrow \pm\infty & S &\rightarrow 0 \\y &\rightarrow \pm\infty & S &\rightarrow 0.\end{aligned} \quad (3.18)$$

У випадку, коли верхня границя області $z_2 = H$ знаходиться високо, то ставиться умова або звертання в нуль самої функції, або вертикального турбулентного потоку домішки, тобто

$$\text{при } z_2 = H \quad S = 0 \text{ чи } k_z \frac{\partial S}{\partial z} = 0. \quad (3.19)$$

У граничному випадку

$$\text{при } z \rightarrow \infty \quad S \rightarrow 0 \quad k_z \frac{\partial S}{\partial z} \rightarrow 0. \quad (3.20)$$

Особливе значення має постановка граничної умови на нижній границі області інтегрування, якщо нею є підстилаюча поверхня, що може мати два істотно різних види:

- 1) водяна поверхня;
- 2) ґрунт, сніг, рослинний покрив.

Водяна поверхня цілком поглинає домішку, що надходить до неї. Це можна записати умовою

$$\text{при } z = 0, \quad S = 0. \quad (3.21)$$

У випадку твердої підстилаючої поверхні, чи рослинності мають місце два протилежних процеси: поглинання і відбиття домішки, що надходить до поверхні з атмосфери.

Розглянемо випадок відсутності власної вертикальної швидкості [$\omega_a=0$]. Якщо земна поверхня відбиває падаючий на неї потік домішки цілком, то граничну умову запишемо у виді:

$$\text{при } z=0; \quad k_z \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad . \quad (3.22)$$

Якщо поверхня відбиває лише частину домішки, то якась частина домішки повинна осісти на ній (сухе осадження). Тоді цю частину потоку домішки виразимо як βS , де β - деякий коефіцієнт, що враховує ці процеси. У цьому випадку граничні умови приймають вид:

$$\text{при } z=0; \quad k_z \frac{\partial S}{\partial z} - \beta S = 0. \quad (3.23)$$

Якщо ми маємо справу з «важкою» домішкою [$\omega_a < 0$], то в цьому випадку потік домішки, що надходить до поверхні в результаті розходження щільності домішки і повітря, виразиться у виді: $-\omega_a$. Якщо цей потік врахувати в умові балансу потоків домішок на поверхні, то гранична умова на поверхні прийме вид:

$$\text{при } z=0; \quad k_z \frac{\partial S}{\partial z} - \beta S - \omega_a S = 0 \quad . \quad (3.24)$$

З останньої умови (3.24) граничні умови (3.21)-(3.23) можна одержати як окремі випадки. Думавши в (3.24) $\beta \rightarrow \infty$ одержуємо (3.21), прийнявши $\omega_a=0$ і $\beta=0$, одержуємо (3.22). І нарешті, поклавши $\omega_a=0$, одержимо умову (3.23). Таким чином, (3.24) – це загальний вид нижньої граничної умови.

3.3 Вплив орографії на поширення домішки від джерела

Вплив орографії дуже складний і виявляється, головним чином, через метеорологічний режим, що виникає в гірських районах. Своєрідність вітрового режиму (гірничо-долинні вітри), хмарності й опадів у гірських

районах приведе до посилення чи ослаблення процесів трансформації домішки чи її видаленню з атмосфери. При цьому особливо важливе значення мають вертикальні рухи повітря і посилення турбулентності, обумовлені орографією.

Розглянемо окремий випадок: процес поширення важкої домішки, що має спадну власну швидкість осадження ω_a , на навітряній і підвітряній сторонах великого гірського масиву з рівною поверхнею, висота якого $Z = \xi(x)$ залежить тільки від X (рис.3.1).

Нехай швидкість потоку повітря u (без обліку впливу гірського масиву), що рухається до навітряної і по підвітряній сторонах гірської системи, спрямована уздовж осі X и не залежить від висоти. У цьому випадку над горами виникає вертикальна складова швидкості повітря

$$\omega_0 = u \frac{\partial \xi}{\partial x}. \quad (3.25)$$

Тоді на навітряній стороні гірської системи $\frac{\partial \xi}{\partial x} > 0 \Rightarrow \omega_0 > 0$.

На підвітряній стороні гірської системи $\frac{\partial \xi}{\partial x} < 0 \Rightarrow \omega_0 < 0$.

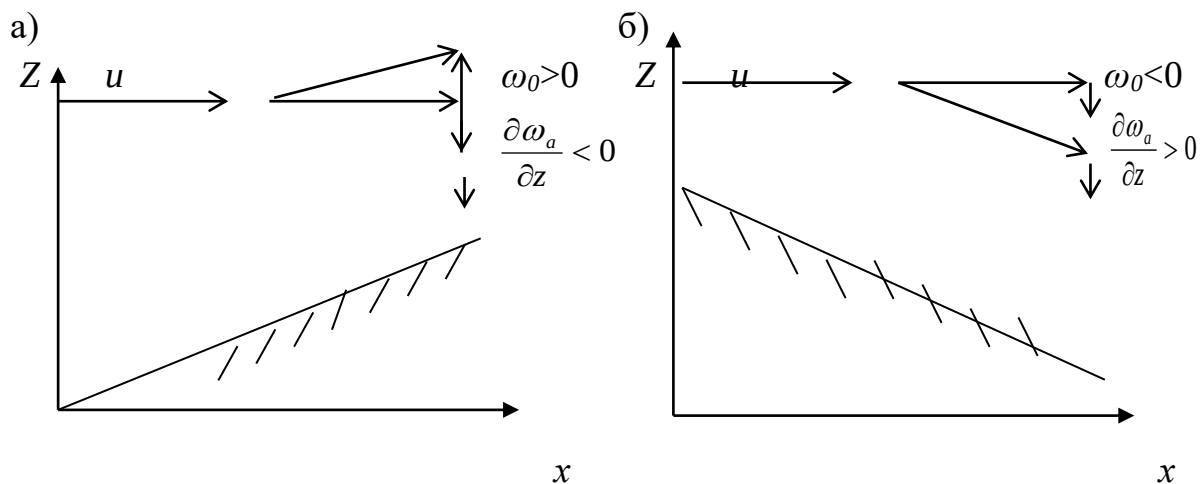


Рисунок 3.1 - Схема руху повітря і важкої домішки на навітряній (а) і підвітряній (б) сторонах гірського масиву [7]

Виникаючі вертикальні швидкості повітря, завдяки тертю об важкі частки домішки, будуть приводити до *ослаблення біля земної поверхні спадних рухів* домішки ω_a на навітряній стороні гори і до їхнього

посилення на стороні. Це приведе до того, що на навітряній стороні будемо мати $\frac{\partial \omega_a}{\partial z} < 0$, а на підвітряній - $\frac{\partial \omega_a}{\partial z} > 0$.

На підставі рівняння балансу приймемо для зміни концентрації за рахунок дивергенції власної швидкості часток ω_a можна написати

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{\partial s \omega_a}{\partial z}; \quad \text{чи} \quad \frac{\partial s \omega_a}{\partial z} = s \frac{\partial \omega_a}{\partial z} + \omega_a \frac{\partial s}{\partial z}. \quad (3.26)$$

Вважаємо, що для випадку незалежності концентрації від висоти поблизу поверхні гір (вертикальний градієнт $\frac{\partial s}{\partial z} = 0$)

$$\frac{ds}{dt} = -s \frac{\partial \omega_a}{\partial z}. \quad (3.27)$$

Як уже говорилося, на навітряній стороні гір $\frac{\partial \omega_a}{\partial z} < 0$, отже, $\frac{ds}{dt} > 0$, тобто йде нагромадження домішки.

На підвітряній стороні $\frac{\partial \omega_a}{\partial z} > 0$, отже, $\frac{ds}{dt} < 0$ - йде розсіювання домішки.

При складних вертикальних рухах унаслідок зміни напрямку потоку повітря (вітру), підприємства ризиковано будувати в умовах складної орографії [1,7].

3.4 Рівняння балансу атмосферних домішок при стаціонарних процесах при постійному напрямку вітру

При дослідженні поширення атмосферних домішок поблизу їхніх джерел правомірно розглянути випадок, коли характеристики атмосфери і концентрації домішок у часі не змінюються, тобто ми спостерігаємо стаціонарний процес. При наявності одного чи декількох крапкових чи лінійних джерел можна при цьому обмежитися невеликим обсягом простору (десятки кілометрів по горизонталі і сотні метрів по вертикалі, що відносять до мезомасштабу). У такій постановці задача розсіювання атмосферних домішок поблизу їхніх джерел детально вивчена М.Е.Берляндом і Н.Л. Бизовой [1, 4].

Припустимо, що в зазначеному обсязі повітря напрямок його руху з висотою не змінюється. Направимо вісь X уздовж вектора вітру і покладемо, що власна швидкість домішки в цьому обсязі повітря постійна. За таких умов рівняння балансу домішки можна записати

$$u \frac{\partial s}{\partial x} + \omega_a \frac{\partial s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial s}{\partial z} . \quad (3.28)$$

Порівняємо по порядку величин перші члени правої і лівої частини рівняння. Прийемо для оцінних розрахунків наступні значення:

$$D(\partial x) = L = 10^4; \quad D(S) = S_0; \quad (3.29)$$

$$D(u) = V = 10; \quad D(k_x) = K_x = 10 \quad (3.30)$$

$$D(u \frac{\partial s}{\partial x}) = \frac{VS_0}{L}; \quad D(\frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial s}{\partial x}) = \frac{K_x S_0}{L}; \quad (3.31)$$

Візьмемо відношення порядків цих величин

$$D(u \frac{\partial s}{\partial x}) \div D(\frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial s}{\partial x}) = \frac{VS_0}{L} \cdot \frac{L^2}{K_x S_0} = \frac{V \cdot L}{K} = \frac{10 \cdot 10^4}{10} = 10^4 . \quad (3.32)$$

Відношення показує, що другий член малий у порівнянні з першим і ним можна зневажити. Ця обставина відбиває той факт, що домішки ніколи не поширюються проти вітру:

$$u \frac{\partial s}{\partial x} \gg \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial s}{\partial x} .$$

Тоді рівняння балансу буде мати вид:

$$u \frac{\partial s}{\partial x} + \omega_a \frac{\partial s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial s}{\partial z} . \quad (3.33)$$

Припустимо, що крапкове джерело знаходиться в крапці з координатами: $x=x_1, y=y_1, z=z_1$. Тоді можна прийняти, що потік домішки виражається за допомогою дельта-функції Дирака

$$\varepsilon_a(x_1, y_1, z_1) = M \delta(x) \delta(y) \delta(z) , \quad (3.34)$$

де M - потужність джерела, за час його дії - δt ;

$\delta(x)$, $\delta(y)$, $\delta(z)$ – дельта-функції.

Сформулюємо граничні умови. Помістимо джерело потужністю M в крапку $X=Y=0$, $Z=H$. Це джерело створює конвективний потік домішки уздовж осі X . Величина цього потоку приймається як одна з граничних умов, тобто при $X=0$

$$Q = U \cdot S = \frac{M}{l^2} = M\delta(y)\delta(z-H), \quad (3.35)$$

де l^2 - одиниця площі.

Інші граничні умови приймаються як і раніше, тобто

При $x \rightarrow \pm\infty$ $S \rightarrow 0$.

При $y \rightarrow \pm\infty$ $S \rightarrow 0$.

При $z=H$ $S=0$ чи $k_z \frac{\partial s}{\partial z} = 0$.

При $z \rightarrow \infty$ $S \rightarrow 0$ чи $k_z \frac{\partial s}{\partial z} \rightarrow 0$.

При $z=0$, $S=0$ (повне поглинання домішки підстиляючою поверхнею), чи $k_z \frac{\partial s}{\partial z} = 0$ (повне відображення домішки поверхнею),

чи $k_z \frac{\partial s}{\partial z} - \omega_a s - \beta s = 0$ (частина домішки поглинається, а частина осаджується - сухе осадження).

Якщо обмежитися випадком легкої домішки, коли $\omega_a = 0$, тобто вертикальний потік домішки у земної поверхні відсутній, тоді граничні умови приймуть вид

при $z=0$, $k_z \frac{\partial s}{\partial z} = 0$,

при $\left. \begin{array}{l} z \rightarrow \infty \\ y \rightarrow \pm\infty \\ x \rightarrow \pm\infty \end{array} \right\} S \rightarrow 0$.

3.5 Чисельне моделювання процесів забруднення атмосфери великих міст і їхнього впливу на термічний режим атмосфери

У великих містах зосереджені промислові комплекси, що викидають в атмосферу величезна кількість газоподібних і твердих відходів виробництва. У побутових цілях спалюється тверде, рідке і газоподібне паливо, що супроводжується викидом в атмосферу різних домішок і виділенням тепла [1,4,7].

Різні інгредієнти «скидаються» на земну поверхню й у водяні басейни, стан яких впливає на нижні шари атмосфери. Житлова і промислова забудови, характер обробки ґрунту, стан рослинного покриву впливають на фізичні властивості земної поверхні, зокрема на її теплоємність, відбивну здатність і «шорсткість». Це приводить у зонах великих міст до значної зміни складу і властивостей атмосфери, до її забруднення. А ЗА впливає на перетворення сонячної радіації, у результаті чого змінюються процеси теплообміну в атмосфері, а також процеси фотосинтезу.

Керування господарською діяльністю і, зокрема, викидами промислових об'єктів можуть дати позитивний ефект, якщо воно робиться на науковій основі. Одним з головних при цьому є метод чисельного моделювання процесів, що приводять до зміни природного середовища під впливом господарської діяльності суспільства, тобто під впливом антропогенних факторів.

Це відноситься і до моделювання процесів ЗА і зміни термічного режиму атмосфери. Мається велике число досліджень, де ця задача була поставлена і вирішена стосовно до деяких приватних умов.

Якщо в попередніх лекціях були викладені теоретичні основи і методи розрахунку поширення атмосферних домішок від різних джерел, то зараз за допомогою приведених раніше й аналогічних формул для концентрації атмосферних домішок може бути змодельований процес поширення ЗА для умов великих міст, якщо відоме розташування і продуктивність джерел.

Якщо провести моделювання процесу поширення шкідливої домішки у великому місті при обліку усіх більш-менш значних джерел, то шляхом «виключення» з нього декількох великих джерел, можна установити вплив на ЗА окремих груп джерел. На основі такого роду експериментів можна знайти «оптимальний» розподіл і визначити граничні

потужності джерел для забезпечення умов для найменшого ЗА. Такий спосіб моделювання процесу ЗА корисний для одержання практичних рекомендацій розміщення знову споруджуваних і реконструкції вже існуючих підприємств. Однак він містить ряд недоліків: припущення про стаціонарність процесів і завдання розподілу метеорологічних параметрів. Метеопараметри, що входять у рівняння балансу домішок, залежать від часу і самі повинні розраховуватися при рішенні більш загальної задачі про просторово-тимчасовий розподіл метеопараметрів і ЗА. Ця загальна задача містить у собі й облік впливу ЗА на метеорологічний режим.

Постановка задачі. Будемо виходити з того, що процеси ЗА і зміна метеоелементів під впливом великих міст відбуваються тільки усередині планетарного прикордонного шару (ППШ) висотою $h \approx 1-2$ км, особливо в його нижній частині висотою $h_1 \approx 50$ м [7]. У такому випадку при площі міста $50 * 50$ км² для рішення поставленої задачі досить розглянути ділянку атмосфери з горизонтальними розмірами порядку сотень кілометрів, вертикальними 1-2 км. Це мезометеорологічний полігон, що включає в себе поверхневий шар ґрунту товщиною порядку $d \approx 20$ см, а задачу розрахунку метеорологічного режиму і поширення забруднень у ньому як мезометеорологічну. Відповідно до цього як гідродинамічну основу задачі можна прийняти рівняння гідротермодинаміки мезопроцесів.

Обмежимося далі розглядом випадка моделювання метеорологічного процесу і поширення забруднень за добу. Значення метеорологічних елементів, а також концентрації атмосферних домішок поза мезометеорологічного полігону будемо вважати відомими. Їх можна розрахувати на основі чисельної прогностичної моделі великомасштабних атмосферних процесів. Невідомими ж будуть значення метеорологічних елементів і концентрації ШР усередині мезометеорологічного полігона. При цьому розподіл і потужність джерел забруднень, а також фізичні властивості підстилаючої поверхні (її рельєф, забудови, лісопаркові зони і т.д.) повинні бути задані.

З фізичних розумінь ясно, що властивості підстилаючої поверхні, а також нерівномірний розподіл забруднень у просторі повинні впливати на процеси конвекції, утворення хмарності й опадів. Однак ці процеси можуть бути розглянуті і враховані ізольовано від поставленої задачі. Через це тут не будуть розглянуті також припливи тепла, зв'язані з фазовими переходами, а також процеси, обумовлені нестатичністю атмосферних рухів. Останнє означає, що рівняння гідротермодинаміки

макропроцесів будуть узяті в наближенні квазистатичності, тобто при використанні рівняння статики.

Грунтуючись на оцінках порядків величин окремих членів рівнянь, можна показати, що при рішенні поставленої задачі членами рівняння, що описують ефект турбулентної в'язкості, обумовлений турбулентними пульсаціями швидкості в горизонтальному напрямку, можна зневажити. Крім того, атмосферні рухи в мезометеорологічному полігоні можна прийняти нестисливими ($d\rho/dt=0$), що також підтверджується оцінками порядків величин.

У відповідності зі сказаним для рішення зазначеної задачі візьмемо рівняння горизонтального руху у виді:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = l(v - v_g) + \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -l(u - u_g) + \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial v}{\partial z}. \quad (3.37)$$

Рівняння нерозривності

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (3.38)$$

Рівняння припливу тепла

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{c_p \rho} \varepsilon_a + \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (3.39)$$

Рівняння переносу вологи

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial q}{\partial z}. \quad (3.40)$$

Рівняння балансу атмосферних домішок

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} + \frac{\partial S w_a}{\partial z} = \varepsilon_a + \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial S}{\partial z}. \quad (3.41)$$

Рівняння теплопровідності в ґрунті

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\lambda_s}{\rho_s c_s} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2}. \quad (3.42)$$

Тут і далі $u_g = -\frac{1}{l\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$, $v_g = \frac{1}{l\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$, - швидкості геострофічного вітру уздовж осей x и y , p — тиск, $l = 2\varpi \sin \varphi$ — параметр Кориоліса, φ — широта місця, $\varpi = 0,729 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ — кутова швидкість обертання Землі, $k = k_z$ — коефіцієнт турбулентної в'язкості, зв'язаний з турбулентними пульсаціями по вертикалі, T — температура, і ε_n — променистий приплив тепла до одиниці об'єму, c_p — питома теплоємність повітря при постійному тиску, q — питома вологість повітря, λ_s, ρ_s, c_s — коефіцієнти теплопровідності, щільності і теплоємність ґрунту відповідно.

У найпростішій постановці задачі значення коефіцієнта турбулентності k вважається заданим. Далі буде обговорюватися саме цей варіант. У більш складній постановці задачі для визначення коефіцієнта турбулентності вводяться додаткові рівняння.

Для визначення променистого припливу тепла ε_n вводяться ще рівняння переносу променистої енергії. Після цього система рівнянь гідротермодинаміки мезопроцесів стає замкнутою. Не розглядаючи тут цю частину задачі, будемо вважати далі величини ε_n відомими. З обліком сказаного система семи рівнянь (3.36)—(3.42), що містить сім невідомих, є замкнутою. Для рішення цієї системи рівнянь необхідно поставити початкові і граничні умови. Як початкову умову приймемо, що в момент часу $t=0$ значення всіх семи шуканих перемінних усередині мезометеорологічного полігона, що включає в себе також шар ґрунту глибиною порядку $d=20 \text{ см}$, є заданими.

Сформулюємо тепер граничні умови. Як уже говорилося, поза мезометеорологічним полігоном значення всіх шуканих перемінних визначаються на основі великомасштабної моделі. Це, зокрема, означає, що на висотах $z=h$ при рішенні поставленої задачі величини u , v , ω , T , q і S відомі. У випадку, якщо великомасштабна прогностична модель не дозволяє розраховувати значення концентрації домішки, то як граничні умови для S приймаються умови виду (3.17), (3.18) і (3.19). Зокрема, звичайно приймається це поза метеорологічним полігоном $s=0$, що також означає, що

$$\text{при } z=H \quad S=0. \quad (3.43)$$

Найбільш складне питання про постановку граничної умови на земній поверхні. Для концентрації домішки приймається одна з умов (3.21), (3.22), (3.23) чи (3.24). Наприклад, умова (3.24) при $z=0$

$$k_z \frac{\partial s}{\partial z} - w_a s - \beta s = 0. \quad (3.44)$$

Для інших перемінних приймається

$$\text{при } z=0 \quad u=v=w=0, \quad T=T_s, \quad q=q_0(T_s), \quad (3.45)$$

$$(1-A)S + G - \delta \sigma T_s^4 + \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \gamma_a \right) - \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} - LQ - H_a = 0, \quad (3.46)$$

де $q_0(T_s)$ — задана функція, A — альbedo поверхні, що підстилає, S і G - спадні потоки короткохвильової (сонячної) і довгохвильової радіації $\lambda = k c_p \rho$ та λ_s - коефіцієнти теплопровідності повітря і ґрунту (води); γ_a - сухоадиабатичний градієнт температури повітря; σ - постійна Стефана-Больцмана $\delta \approx 1$ - відносна випромінювальна здатність (коефіцієнт «сірості») поверхні, що підстилає, L - теплота конденсації чи випару, H_a — потік тепла від поверхні в атмосферу, обумовлений антропогенними факторами.

Співвідношення (3.46) — рівняння теплового балансу підстилаючої поверхні, у ньому величини

$$N = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \gamma_a \right), \quad Q = -k \rho \frac{\partial q}{\partial z}, \quad B = -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \quad (3.47)$$

являють собою потоки тепла і вологи між підстилаючою поверхнею і повітрям, і потік тепла між підстилаючою поверхнею і глибинними шарами ґрунту (води) (вони вважаються позитивними при їхньому напрямку нагору).

Система нелінійних диференціальних рівнянь (3.36)—(3.42) через надзвичайну складність не може бути вирішена аналітично. Тому вона вирішується чисельними методами. Згідно з цими методами, у розглянутій ділянці атмосфери і ґрунту вводиться просторова сітка крапок. Диференціальні рівняння і граничні умови апроксимуються кінцево-різницевиими рівняннями, а початкові дані задаються у вузлах просторової

сітки крапок. У такій сітці крок по горизонтальних координатах приймається близько 1—2 км, а по вертикальній — близько 100—300 м. Шляхом чисельного інтегрування кінцево-різницевих рівнянь за часом знаходяться значення всіх шуканих функцій у вузлах сітки в різні моменти часу.

Зміни метеорологічних елементів за часом, що розраховуються зазначеним шляхом, приводять до відповідної зміни концентрацій різних атмосферних домішок. Це впливає також і з аналізу рівняння балансу домішки. У свою чергу, зміни концентрації атмосферних домішок, особливо аерозолів, будуть приводити до зміни припливів тепла в атмосфері і до підстилаючої поверхні, що і приводить потім до зміни всіх метеорологічних елементів.

Більш повні теоретичні схеми для моделювання процесів забруднення великих міст і їхній вплив на термічний режим атмосфери були запропоновані Г. И. Марчуком, М. А. Атвотером і ін. У той же час існують і спрощені моделі. Одна з них була запропонована Н. С. Вельтищевой. У цій останній замість тривимірної розглянута одномірна модель, у якій збережені тільки вертикальні перемінні. Вона виходить з викладеної схеми, якщо прийняти в ній умову горизонтальної однорідності, тобто покласти, що всі горизонтальні похідні звертаються в нуль.

На основі різних моделей були проведені численні чисельні експерименти для умов, що імітують умови великих міст. У результаті цих експериментів шляхом імітування різних джерел домішки й антропогенних потоків тепла, удалося установити, що в зоні великих міст виникає «острів тепла», температура повітря в який перевищує температуру навколишньої місцевості влітку на 4—6°, а узимку — на 1—2°. Удалося установити також істотну залежність просторово-часового розподілу забруднення атмосфери від рельєфу місцевості міста і від метеорологічних умов. На основі цих експериментів відшукуються «оптимальні» умови, для розміщення і продуктивності джерел забруднень.

Питання для самоконтролю:

1. Назвіть внутрішні та зовнішні причини притоку та стоку забруднювальних речовин у рівнянні балансу атмосферних домішок.
2. У чому полягають початкові та граничні умови рішення рівняння балансу атмосферних домішок?

3. Назвіть початкову умову для рішення рівняння балансу атмосферних домішок.
4. Як врахований вплив турбулентної дифузії на зміну концентрації домішки у рівнянні балансу атмосферних домішок?
5. Що є пасивні атмосферні домішки?
6. Як розповсюджуються пасивні домішки від миттєвих та безперервних джерел при постійному коефіцієнті турбулентності?
7. Що є функція впливу джерела викиду?
8. Яке рішення рівняння балансу атмосферних домішок при стаціонарних процесах для граничного шару атмосфери?
9. Які особливості впливу орографії на розповсюдження домішок від джерела?
10. Як моделюють процеси забруднення атмосфери великих міст і їхнього впливу на термічний режим атмосфери?
11. Як впливає забруднення атмосфери на термічний режим міст?

4 ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗІВ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ У МІСТІ

4.1 Фізичні основи прогнозування забруднення повітря

Однією з реальних можливостей поліпшення стану повітряного басейну є короточасне зниження викидів та концентрацій домішок у час НМУ на основі короткотермінового прогнозу. Але приймати рішення щодо скорочення викидів промислових об'єктів можливо лише на основі надійного прогнозу забруднення атмосфери (ЗА). В останні роки у нас та за кордоном велику увагу приділяють короткотерміновим прогнозам забруднення повітря (ЗП) та відверненню високих рівнів забруднення атмосфери (ВРЗА) у приземному шарі атмосфери у час НМУ. В більшості випадків, викиди здійснюються за рахунок старих виробництв без очищення вихідних газів. Під час НМУ не повинно бути “залпових викидів”. У різних регіонах умови розсіювання різні, виходить, при тій самій потужності виробництва викиди можуть утворювати різні концентрації.

Важливо відзначити, що роботи по прогнозу ЗП та регулюванню викидів не втратять свого значення і тоді, коли проблема забезпечення чистоти повітряного басейну (ПБ) буде, в основному, вирішена. Зараз, в основному, завершені роботи по нормуванню на підприємствах допустимих викидів, яким відповідають ГДК у приземному шарі повітря. Але ці допустимі викиди забезпечують ГДК при нормальних НМУ, які зустрічаються порівняно часто. У деяких випадках аномальних НМУ, коли концентрація суттєво перевищує норму, ГДК повинна досягатися за рахунок завчасного прогнозування та запобігання можливого росту ЗА. Сказане має відношення і до проектування нових підприємств. Важко передбачити настільки малий викид шкідливих речовин (ШР) в атмосфері та такі високі труби, щоб ні при яких умовах приземні концентрації не перевищували ГДК. Тому на стадії проекту припускається досягнення норми чистоти атмосфери при нормальних НМУ, а у час аномальних НМУ - тимчасове скорочення викидів відповідно з прогнозом забруднення. Такий підхід дає великий економічний ефект. У наступний час прогнозування необхідно практично у всіх містах. Там, де рівень забруднення (РЗ) великий, завдяки заходам, які приймаються у час НМУ, запобігають ВРЗА. Там де РЗ невеликий і тільки іноді концентрації

перевищують ГДК, є можливості повного дотримання гігієнічних норм чистоти атмосфери в наслідок знижування викидів під час НМУ. Таким чином, роботи по захисту атмосфери під час НМУ – це важлива складова частина комплексу заходів по забезпеченню чистоти повітряного басейну.

Цілий ряд катастрофічно високих РЗА, що привели до людських жертв у Токіо, Лос-Анджелесі, Лондоні, Нью-Йорку можна було запобігти, якби провели прогноз ЗП. Вперше прогноз ЗП був складений у США, де з 1955р. почали проводити досвідне, а потім і оперативне прогнозування. При складанні прогнозів апріорі приймали, що ВРЗА має зв'язок з застійними явищами (слабкий перенос та термічна стійкість нижнього шару атмосфери), а також з відсутністю опадів. Але не тільки ці НМУ можуть сприяти формуванню ВРЗА.

Простий приклад прогнозу наводять Боутгер та Сміт [15]. Було допущено, що рівень забруднення атмосфери залежить тільки від поєднання швидкості повітря у землі “ U ” та різниці температури на рівні землі та висоти $H=1$ км. Найбільше забруднення повітря при $\Delta T < 0^\circ\text{C}$, $U \leq 7$ вузлів (3.5м/с) найменше ЗП при $\Delta T > 0^\circ\text{C}$, $U > 7$ вузлів. Але і при невеликому повітрі 5-7 м/с та нестійкій стратифікації може бути високий рівень забруднення (вклад високих джерел). Існує суперечність, що при $\Delta T > 0^\circ\text{C}$ та $U < 7$ вузлів може спостерігатися слабке ЗП.

На території США щоденно виділяють зони можливого формування умов застою повітря. Існують прогнози, які основані на обліку висоти шару змішування (параметру, який враховує стійкість атмосфери). Висота шару змішування визначається на аерологічній діаграмі окремо для ранкового і денного строків. Верхня межа висоти шару змішування знаходиться на рівні схрещення сухої адіабати та кривої стратифікації. Суху адіабату проводять з точки фактичної температури (t^0) з додаванням $3-5^\circ$ (для обліку “острова тепла”).

У роботі Міллера робиться догадка, що на утримання домішок у міському повітрі мають вплив нижчий (0-1 км) та верхній (1-6 км) шари атмосфери. Вплив кожного шару оцінює показник, одержаний при множенні середнього значення атмосферної стійкості, термічного становища повітряної маси, інерції процесів. Метод не дозволяє прогнозувати високий рівень забруднення атмосфери, який не має зв'язку з умовами застою.

Ці прогнози відносяться до синоптико-статистичних і мають зв'язок з емпірико-статистичним аналізом розповсюдження шкідливих речовин і використанням для цієї мети інтерполяційних моделей гаусового типу.

Більш універсальні **чисельні прогнози**, які базуються на розробці теорії атмосферної дифузії, тобто на основі математичного опису розповсюдження домішок за допомогою рішення рівняння турбулентної дифузії.

Статистичні прогнози найбільш прості – множинна лінійна, послідовно графічна регресія та інші широко використовують у різних країнах.

При вивченні метеорологічних умов ЗП та його прогнозу користувалися результатами теоретичних та експериментальних досліджень, які проводились у відділі досліджень повітряного басейну ГГО ім.О.І. Воейкова під керівництвом професора М.Є. Берлянда [1]. Їх важлива особливість - облік метеорологічних умов (МУ) у значному шарі атмосфери. Оскільки сучасні могутні джерела (ТЕС) мають висоту труб більш ніж 150-250 м, перегріті викиди та початковий імпульс, ефективна висота труби за рахунок цього збільшується. При визначених умовах газоповітряна суміш досягає висоти $H \geq 1$ км, як і шапка диму від усього міста. Масштаб забруднення атмосфери поодинокого джерела зближується до масштабу забруднення повітряного басейну міста. Таким чином, закономірності розповсюдження домішок в атмосфері від поодинокого джерела можна перенести на процес забруднення повітря по місту в цілому.

Прогнозування ЗП від поодинокого джерела зводиться до завбачення виявлених для конкретного джерела небезпечних умов погоди і до розрахунку концентрацій, які утворюються при цьому у приземному шарі.

4.2 Чисельний прогноз концентрації шкідливої домішки по дифузійній моделі

У роботах, що виконані в ГГО під керівництвом професора М.Є. Берлянда [1, 3, 4], вивчені закономірності та особливості розповсюдження домішок в АП від джерел в залежності від параметрів викидів і МУ. Рішення цього завдання проводилось на основі інтегрування рівняння турбулентної дифузії:

$$u \frac{\partial S}{\partial x} - \omega_a \frac{\partial S}{\partial z} = k_y \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial S}{\partial z} - \varepsilon_a, \quad (4.1)$$

де S - концентрація домішки у приземному шарі повітря;

u - швидкість вітру;

ω_a - швидкість осідання домішки;

k_z, k_y - вертикальна та горизонтальна складові коефіцієнту турбулентного обміну. Вісь X спрямована в напрямку вітру, вісь Y - перпендикулярно вітру, вісь Z - вертикально догори;

ε_a - приток та стік домішки за рахунок внутрішніх причин.

Рівняння має рішення при межових умовах, згідно з якими джерело домішки потужністю M зосереджені у точці $X=Y=0$ на висоті Z .

Приймається, що на підстилаючій поверхні (при $Z=0$) турбулентний потік домішки відсутній, а на великій відстані ($X, Y, Z \rightarrow \infty$), $S \rightarrow 0$.

Для легких домішок газів та мілко дисперсного пилу приймалось $\omega_a = 0$, а для пилу, який має тенденцію до осідання: $\omega_a > 0$. Швидкість вітру змінюється з висотою по логарифмічному закону, а вертикальна складова коефіцієнту турбулентного обміну k_z лінійно росте з Z до висоти приземного шару повітря, а вище - $k_z = const$. При аномальних умовах (інверсійні шари) урахується різке зменшення k_z у зоні інверсії. Вивчались аномальні випадки відхилення вертикального профілю вітру від логарифмічного у штильових шарах. Горизонтальна складова k_y покладається пропорційній швидкості вітру. Враховується також, що початкова швидкість підймання димових газів та їх перегрів приводить до зросту ефективної висоти джерела викиду домішки.

Прогноз максимальної концентрації по дифузійній моделі.

Після інтегрування рівняння турбулентної дифузії в ГГО отримали висновки про особливості розповсюдження домішок від джерела з гарячими та холодними викидами ($T \approx 0$). У холодних викидах підймання здійснюється тільки за рахунок початкової швидкості викиду.

Інтегрування дозволило отримати максимальну концентрацію S_m , яка утворюється при несприятливих метеорологічних умовах (НМУ), які часто зустрічаються. При $\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial S}{\partial y} = 0$ знаходимо S_m та x_m . Ці висновки увійшли до ОНД-86, у якому наведені формули для розрахунків максимальних

концентрацій у приземному 2-метровому шарі повітря у період НМУ та формули відстань, на яких відбуваються ці концентрації.

При наявності N однакових і близько розміщених гарячих джерел для міських викидів максимальна концентрація дорівнює

$$S_m = \frac{AMFmn\eta}{H^2} \sqrt[3]{\frac{N}{\Delta TV}}, \quad (4.2)$$

де A – коефіцієнт, який враховує розсіювальну здібність атмосфери (несприятливі умови вертикального та горизонтального перемішування). Змінюється від 140 до 250 та розраховується

$$A = \hat{a} \frac{k_1}{u_1 u_0}, \quad (4.3)$$

u – швидкість повітря, $u_1=2\text{м/с}$,

$\hat{a}$ – в деякій залежності від шорсткості підстилаючої поверхні Z і від висоти приземного шару n . Середня шорсткість відображена у $\hat{a}=0.3$,

φ_0 – дисперсія за період T , відхилення середніх напрямків вітру на кут φ .

Для холодних викидів:

$$S_m = \frac{AMFmn\eta}{H^3 \sqrt[3]{H}} \cdot \frac{DN}{8V}, \quad (4.4)$$

M – кількість викинутої речовини (г/с);

H – геометрична висота труби (м);

V – обсяг (витрата) димових газів, які виходять з N труб ($\text{м}^3/\text{с}$);

$$\Delta T = T_z - T_n, \quad (4.5)$$

T_z – температура димових газів;

T_n – температура повітря ($^{\circ}\text{C}$);

D – діаметр устя (м);

η – коефіцієнт, що враховує вплив рельєфу на концентрацію домішки;

F , m , n – безрозмірні коефіцієнти, що пов'язані з особливостями викидів;

F - враховує дисперсний склад пилу та ступень очищення викидів (газ $F=1$; $F=2$ – якщо ККД пристроїв, що уловлюють пил, $>90\%$, $F=2.5$ – при ККД = 75-90, $F=3$ – при ККД $<75\%$);

$$m \text{ залежить від } f = 10^3 \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta T}; \quad m = \frac{1}{0.67 + 0.1\sqrt{f} + 0.34\sqrt[3]{f}}; \quad (4.6)$$

$$n \text{ залежить від } \nu_M = 0.65\sqrt[3]{\frac{V\Delta N}{H}} - \text{гор.}; \quad \begin{cases} n = 1; \nu_M \geq 2 \\ n = 0.532; \nu_M - 2.13\nu_M + 3.13; \\ n = 4.4\nu_M; \nu_M < 0.5 \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\nu_M = 1.3 \frac{\omega_0 D}{H} - \text{хол.} \quad (4.8)$$

Аналіз формул (4.2) та (4.4) дозволяє зробити висновок:

1) Забруднення повітря у районі джерел зменшується зі збільшенням висоти викидів H . Для гарячих викидів даний ефект більше, ніж для холодних ($\frac{1}{H^2}$ та $\frac{1}{H^{4/3}}$).

2) Концентрація домішок зменшується з скороченням кількості викидів речовини M . При цьому очищення однаково ефективно як для холодних, так і для гарячих викидів ($S_m \sim M$).

3) Забруднення повітря при централізації викидів, тобто при зменшенні числа труб N . Цей ефект збільшується для джерел з холодними викидами ($S_m \sim N$), ніж для гарячих ($S_m \sim \sqrt[3]{N}$).

4) При заданій кількості джерел (труб) їх максимальне розповсюдження визначає найменші приземні концентрації домішок в повітрі внаслідок зменшення ефекту накладення викидів.

5) Концентрація ШР у приземному шарі атмосфери зменшується з збільшенням V , тобто зі збільшенням ω_0 , оскільки

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \omega_0. \quad (4.9)$$

Для холодних викидів цей ефект більше, ніж для перегрітих.

6) Концентрація ШР зменшується зі збільшенням температури газів, які виходять (для гарячих джерел), тобто зі збільшенням ΔT .

Для холодних – великий вплив має температура повітря.

Приземна концентрація S має максимальне значення на деякій відстані x_m по напрямку вітру (уздовж осі X)

$$x_m = \frac{5-F}{4} dH. \quad (4.10)$$

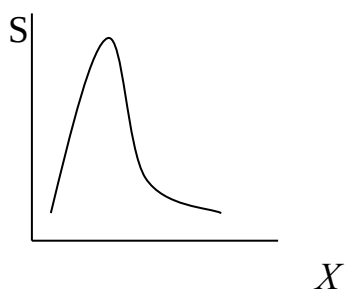


Рисунок 4.1 – Вигляд розповсюдження приземної концентрації домішки по осі X

D залежить в основному від v_m , d маленьке при слабких вітрах внаслідок цього x_m мало. Для твердих важких домішок F збільшується, внаслідок цього x_m менш, ніж для легких.

Для гарячих викидів $d \approx 20$ внаслідок цього відзначається на відстані $20H$ від джерела.

Для холодних викидів $x_m \rightarrow 5-10 H$.

Зміна “ S ” по осі факелу та поперек.

$S = S_1 S_m$ – по осі факелу концентрація визначається коефіцієнтами S_1

$$S_1 = f(x/x_m) \quad (4.11)$$

Концентрація шкідливих речовин з усуненням від джерела з початку швидко збільшується, особливо при x/x_m (для гарячих джерел цей діапазон $10-40H$). На відстані $10-15$ км від крупних джерел залишається $S \approx 0.3$. Це важливо при накладенні факелу від великої кількості джерел. Для низьких джерел $S_1 = 1$ від джерела до x_m .

Для низьких джерел ($H < 10$ м) зменшується мінімум концентрації поблизу джерела, а при $H = 2$ м зовсім зникає.

Таким чином, могутні промислові об’єкти можуть утворювати великі області з підвищеними концентраціями ШР у приземному повітрі. Суперпозиція цих областей від багатьох джерел визначає поле

концентрації у місті. Облік концентрації домішок, утворених окремими джерелами дозволяє оцінити вклад кожного джерела у формування РЗА.

4.3 Практичні питання прогнозу забруднення повітря в районі окремих джерел

Методика прогнозу ЗП розроблена Берляндом М.Є. [1]. Прогнозування зводиться до передбачення встановлених НМУ, що викликають ВРЗА в приземному шарі в районі джерел і до розрахунку концентрації S_m . Це роблять для джерел викидів об'єктів значного ЗА: промислових, енергетичних, опалювальних, транспортних та ін. підприємств. Для цих джерел уточнюються параметри викидів для розрахунку S_m при нормальних НМУ. Труднощі можуть бути пов'язані як зі складністю передбачення деяких елементів погоди, так і з відсутністю регулярних аерологічних спостережень.

1. Спочатку розраховують S_m для заміських підприємств, тоді прогноз вітру з боку об'єкта в поєднанні з небезпечною швидкістю вітру u_m вже може бути достатнім для попередження об'єктів про НМУ.

2. Визначають НМУ для кожного об'єкта. Вони можуть істотно різнитися. Розраховують u_m . Якщо на підприємстві викид з різновисоких труб, то розраховують середньозважену u_m .

3. Визначають небезпечний напрям вітру: з боку джерела на місто; на райони міста з щільною забудовою (можлива місцева циркуляція); на ділянки зі складним рельєфом; на лікувальні та дитячі установи; виділяють напрямок вітру з найбільшим накладенням викидів ряду джерел.

4. Встановлюються межі висоти нижньої межі підвищеної інверсії, з якою пов'язані небезпечні концентрації (інверсія над джерелом, але не вище 200 м).

5. Визначаються інтервали швидкостей вітру на рівні викидів, які призводять до інтенсивного ЗП в приземному шарі. Ці швидкості відповідно до логарифмічного закону зміни швидкості вітру з висотою більше небезпечної u_m . При трубах 100-200 м вони більше u_m в 1,5-2 рази.

6. НМУ визначається для кожного джерела або групи джерел.

Всі джерела відповідно до МУ, при яких в їхньому районі створюються екстремально високі концентрації домішок, можуть бути розділені на 3 групи. У кожній групі свої комплекси небезпечних метеопараметрів [8].

Високі джерела з гарячими викидами:

- швидкість вітру у землі 3-7 м/с (інтервал, близький до u_m) супроводжується підвищеною інверсією, нижня межа якої на висоті 100-200м над джерелом викидів;
- у земної поверхні штиль, на висоті викидів швидкість вітру в 1,5-2 рази більше u_m ;
- швидкість вітру більше 2 м/с супроводжується туманом;
- несприятливий напрямок вітру при його швидкості 3-7 м/с;
- фактичне зростання приземної концентрації до значення S_m і більше під факелом об'єкта при швидкості вітру 3-7 м/с.

Високі джерела з холодними викидами:

- швидкість вітру у Землі 0-2 м/с супроводжується підвищеною інверсією, нижня межа якої вище джерела;
- швидкість вітру 0-2 м/с супроводжується туманом;
- несприятливий напрям вітру при його швидкості не більше 3 м/с;
- у землі штиль, на рівні викидів швидкість 2-4 м/с;
- фактичне зростання концентрації під факелом об'єкта при слабкому вітрі.

Якщо кілька НМУ спостерігається одночасно, то небезпека ЗП зростає. Наприклад, штиль у землі при швидкості вітру на рівні викидів 1,5-2 u_m може супроводжуватися підвищеною інверсією і туманом.

Джерела неорганізованих викидів:

- максимальна концентрація в приземному шарі при штилі зі стійкою стратифікацією.

Однак існують аномальні НМУ, коли концентрація домішок S більше їх S_m .

Аномальні НМУ щодо основних груп джерел наведені у табл.4.1.

Можуть бути проміжні класи джерел, тому таблиця вимагає уточнення. НМУ можуть бути встановлені для окремих виробництв, цехів, тому що на заводі існують і високі гарячі, і середні гарячі і завжди неорганізовані викиди.

Прогноз при швидкості вітру, близької до u_m , здійснюється так:

- при перенесенні викидів на райони щільної забудови або складного рельєфу прогнозують $S = 1,5-2 S_m$;

- при здійсненні одного з трьох перерахованих несприятливих комплексів метеопараметрів прогнозують $S = 1,5-2 S_m$;
- якщо при u_m викиди здійснюються в райони з щільною забудовою і складним рельєфом, а над джерелом розташовується нижня межа підвищеної інверсії, то прогнозується концентрація $S = 3-4 S_m$;
- при холодних викидах поєднання дуже слабкого вітру (до 2 м/с) і підвищеної інверсії, що обмежує початковий підйом вихідних газів, визначає рівень концентрації $S = 5 S_m$ і більше.

Таблиця 4.1 - Аномально небезпечні метеорологічні умови
для основних груп джерел викидів [8]

Характеристика викидів	Швидкість вітру (м/с) на рівні		Вертикальний турбулентний обмін в нижньому шарі	Інверсія
	флюгеру	викидів		
Гарячий високий	3-7 штиль	7-12 7-12	Підвищений Підвищений	Підвищена
Холодний високий	Штиль 1-2	2-4 2-4	Підвищений Підвищений	Підвищена
Низький	Штиль	Штиль	Знижений	Приземна

Ці прогностичні значення будуть характеризувати концентрації, які створюються конкретним джерелом або групою джерел. В умовах міста вони можуть відрізнятися від реально спостережуваних через неврахований вплив інших джерел. Але це не є суттєвим при захисті атмосфери від забруднення.

4.4 Прогноз концентрації шкідливої домішки по гаусовій моделі

Для опису розповсюдження домішок в АП, наряду з рішенням рівняння турбулентної дифузії, широко використовуються формули гаусового розподілу концентрацій, які отримані на статистичній основі. Одна з перших робіт у цьому плані належить Сетону (1958 р), який поклав, що у загальному випадку концентрація домішки S у точці (X, Y, Z) від джерела, який знаходиться з початку координат, пропорційна множенню

$$P_y = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-y^2 / 2\sigma_y^2} \quad (4.12)$$

на аналогічні функції P_z та P_x , які відносяться до координат Z та X , тобто

$$S \approx P_x \cdot P_y \cdot P_z. \quad (4.13)$$

Тут σ_y^2 - дисперсія розподілу домішки у напрямку Y .

Сетон завадал визначений вид лагранжової кореляційної функції для концентрацій, потім використав теорему Тейлора про зв'язок цієї функції з σ_i та отримав

$$\sigma_i = \frac{1}{2} C_i^2 (\bar{u}t)^{2-n}, \quad (4.14)$$

де C_i - деякі коефіцієнти ($i=1,2,3$ відповідають X, Y, Z), $\bar{u}$ - середня по висоті швидкість вітру. У випадку миттєвого джерела t - час після початку дії джерела, а для безперервно діючого джерела покладається, що $t = \frac{X}{\bar{u}}$.

Сетон показав також, що при відібраному ним вигляді кореляційній функції повинен виконуватись ступеневий закон для зміни швидкості вітру з висотою, де показник ступені пов'язано з n у $u=u_1 Z^n$. Внаслідок цього параметр n , необхідний для розрахунку концентрації можна визначити по вертикальному профілю швидкості вітру і цим посередньо облікувати умови стратифікації.

Спочатку Сетон отримав формулу для випадку окремих джерел, яка потім підтвердилась результатами спостережень у Портоні (Англія) при рівноважних умовах до невеликих відстань (кілька сот метрів). Потім ця формула була використана без достатнього обґрунтування і для випадків високих джерел.

Для вивчення закономірностей розповсюдження домішки, перевірки та уточнення формул для розрахунку атмосферної дифузії, визначення в них метеорологічних параметрів широко ведуться експериментальні роботи в США, Англії, Швеції. Більшість цих досліджень високо технічно обладнанні, довгочасні та містять велику кількість трудомістких та багатокоштовних спостережень з наземними та високими джерелами квазімиттєвої та безперервної дії.

1) По проекту “Грин Глоу” у штаті Вашингтон (США) утворювалися наземні джерела сірчаного цинку. Вибір проб здійснювався у 833 точках, які знаходилися на концентричних дугах навколо джерела, на перших чотирьох дугах установлювали по п’ять щоглів висотою до 60м.

2) Національна лабораторія у Нью-Йорку проводила періодичні спостереження з користуванням 130-метрової щогли більш 15 років.

3) Крупні експерименти проводились у США з користуванням патронів пластикових балонів постійного рівня (назва їх складена з початку та кінця слів - тетраїдні балони). Тетрони підкоряються рухам повітря і грають роль трасера і дозволяють по спостереженням за їх траєкторією судити о інтенсивності турбулентного розсіювання.

В працях Сетона та інших на основі емпірико-статистичних міркувань часто приймається, що наземна концентрація домішки виражається формулою

$$S = \frac{M}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \cdot e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2} - \frac{Y^2}{2\sigma_y^2}}, \quad (4.15)$$

де M – емісія викиду (кількість викинутої речовини в одиницю часу).

З формул (4.12) та (4.13) видно, що M відсутня, але Сетону довелося додати її в формулу емпіричним шляхом, оскільки концентрація домішки безумовно залежить від потужності джерела викиду.

Швидкість вітру та інших факторів звичайно визначають у відповідності з класами стійкості приземного шару по Песквілу. На основі цієї класифікації Гиффорд побудував спеціальний графік для визначення горизонтальної (σ_y) та вертикальної (σ_z) дисперсії.

Існують формули Брігса для випадка рівної відкритої місцевості і відстань X от 100 м до 10 км

$$\sigma_y = \frac{\alpha_y X}{\sqrt{1 + 10^{-4} X}}; \quad \sigma_z = \frac{\alpha_z X}{\tilde{s}_z(X)}. \quad (4.16)$$

Коефіцієнти α_y , α_z і функція $\tilde{s}_z$ затабульовані для 6 класів стійкості.

У деяких роботах приймається

$$\sigma_y = a_1 X^{\alpha_1}, \quad \sigma_z = b_1 X^{\beta_1} \quad (4.17)$$

де α_1 , β_1 та a_1 , b_1 - константи, які визначаються емпірично. Вони отримані для відстань від 1 до 100 км та затабульовані.

Розшук екстремума з умови: $\frac{\partial \bar{S}_m}{\partial u} = 0$ обмежується залежністю концентрації тільки від швидкості вітру і не враховується, у відміні від робіт ГГО, вплив стійкості атмосфери, чи точніше інтенсивності турбулентного обміну. Робота Регленда (1976 р.), з формули (1.106) для $S/z=0$ при $y=0$ і (4.17) для σ_z та σ_y з умови $\frac{\partial S_m}{\partial x} = 0$ визначається максимальна концентрація S_m на відстані x_m . Потім користуються виразом для початкового підймання

$$\Delta H = \frac{B_0}{u},$$

де B_0 - деякий параметр, який залежить від характеристики викиду та стійкості атмосфери.

Далі, з рівняння $\frac{\partial S_m}{\partial x} = 0$ знаходять максимальну концентрацію

$$S_m = \frac{M\beta_1 e^{-\frac{\alpha_1 + \beta_1}{2\beta_1} H^{-\frac{\alpha_1}{\beta_1}}}}{\pi a_1 b_1 \alpha_1 B_0 \left[\frac{\alpha_1(\alpha_1 + \beta_1)}{a_1^2 b_1^2} \right]^{\frac{\alpha_1 + \beta_1}{2\beta_1}}} \quad (4.18)$$

та відстань, до якої вона має відношення,

$$x_m = \left[\frac{\beta_1(\alpha_1 + \beta_1)}{a_1^2 b_1^2} \right]^{\frac{1}{2\beta_1}} H^{\frac{1}{\beta_1}} \quad (4.19)$$

та небезпечну швидкість вітру

$$u_m = \frac{\alpha_1}{\beta_1} \frac{B_0}{H}, \quad (4.20)$$

де H - геометрична висота труби.

Оскільки, згідно Песквілу, найбільше значення S_m досягає при $\alpha_1 = \beta_1$. Тоді з (4.18) і (4.20)

$$S_m = \frac{0.058 b_1 M}{B_0 a_1 H}. \quad (4.21)$$

Для різних становищ стійкості Регленд отримав також (суттєво спрощив розрахунки по формулам (4.18-4.20)

$$\frac{S_m B_0}{M} = f H^{-J}; \quad \frac{u_m B_0}{H} = J; \quad x_m = \psi H^{\bar{p}} \quad (4.22)$$

Значення f , J , ψ та $\bar{p}$ затабульовані для різних висот труб та становищ стійкості [1, 4].

Питання для самоконтролю:

1. Назвіть фізичні основи прогнозу забруднення атмосфери.
2. Які існують види прогнозів забруднення атмосферного повітря?
3. Яка характеристика забруднення атмосферного повітря у містах прогнозується у чисельних прогнозах?
4. Які складові рівняння турбулентної дифузії?
5. Яким чином ураховуються особливості термодинамічного стану повітря у прогнозі максимальної концентрації шкідливої домішки від окремого джерела за дифузійною моделлю?
6. Для яких метеорологічних умов розраховують максимальну концентрацію домішки від поодинокого джерела за дифузійною моделлю?
7. У чому різниця розрахунку максимальної концентрації домішки, яка викидається гарячими та холодними джерелами емісії?
8. Які особливості застосування гаусової моделі розповсюдження шкідливої домішки від окремого джерела?
9. Як виглядає розповсюдження приземної концентрації домішки від окремого джерела за дифузійною та гаусовою моделями?
10. На якій відстані від джерела спостерігається максимальна приземна концентрація?
11. Які існують практичні питання прогнозу забруднення повітря в районі окремих джерел?

5 СИНОПТИКО-СТАТИСТИЧНІ ПРОГНОЗИ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ У МІСТІ

До синоптико-статистичних прогнозів ЗА відносять лінійні та нелінійні прогностичні схеми. Множинна лінійна, послідовно графічна регресія, метод розпізнавання образів та інші широко використовуються у різних країнах.

Синоптико-статистичні методи прогнозування забруднення повітря, або їх часто називають *прогнози по місту в цілому*, ґрунтуються на результатах аналізу впливу метеорологічних та синоптичних умов на формування полів концентрацій домішок.

В синоптико-статистичних прогнозах показник ЗП, що прогнозується, називають *предиктант*. У якості предиктанту у схемі прогнозу беруть усередненні по часу та простору характеристики ЗП, а не одиничні концентрації. Параметри, які описують процес переносу і розсіювання домішки (звичайно метеорологічні характеристики) – це *предиктори*.

Врахування конкретних особливостей механізму забруднення повітря досягається завдяки тому, що прогностичні схеми складаються по матеріалам спостережень у кожному місті окремо по сезону, а також (по можливості) для означеного часу доби.

Для найбільш повного обліку фізичного процесу забруднення атмосфери у місті (вибір предикторів) потрібно враховувати асинхронність зв'язків між концентраціями домішок та метеорологічними параметрами: спочатку встановлюються конкретні метеорологічні умови і тільки через деякий час формується відповідний їм рівень забруднення повітря. При використанні у прогностичних схемах метеорологічних параметрів за попередній проміжок часу може відпасти необхідність прогнозування значень предикторів, що в свою чергу приводить до зменшення помилок прогнозу забруднення.

Один з варіантів схем прогнозу, який часто використовується у практиці - це використання метеорологічних предикторів у ранні ранкові години (з трьох до шести за місцевим часом) і показника забруднення повітря у першу половину дня чи за день.

Велике значення має вибір методу, який дозволив би максимально врахувати реальний вид характеру зв'язків між концентраціями та

метеорологічними факторами. Для прогнозування забруднення повітря по місту в цілому необхідно попередньо обробити фактичні матеріали спостережень по конкретному місту за попередні роки

Аналіз різних комбінацій метеорологічних умов за попередню добу та рівня забруднення у наступну добу та по даним спостережень за ряд років дозволили отримати правила прогнозу забруднення повітряного басейну міста [8]. Справджуваність такого прогнозу у деяких містах досягає 90%.

5.1 Узагальнені показники забруднення повітря по місту в цілому

При вивченні забруднення повітря (ЗП) по місту в цілому в першу чергу розглядається складова поля концентрації, яка характеризує одночасні зміни концентрацій по всієї території міста. Ця складова утворюється за рахунок дії великої кількості однотипних джерел з низькими викидами в наслідок накладення та перемішування викидів від усіх джерел міста. При такому підході зменшується випадкова частина інформації, так як можливість випадкового збільшення концентрації різних шкідливих речовин (ШР) в один і той же час в різних частинах міста мала.

Таким чином, при одночасній зміні вмісту домішок в різних районах міста можливо говорити про правдиві одиничні випадки значного зменшення чи збільшення забруднення повітря.

Як узагальнені інтегральні показники ЗП по місту в цілому розглянемо слідуючи три. Всі вони можуть використовуватися як **предиктанти** у синоптико-статистичних прогнозах забруднення повітря.

1. Нормована (безрозмірна) концентрація домішки Q , яка усереднена по всьому місту та по всім строкам спостережень:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{\bar{S}_{\text{сез}}}, \quad (5.1)$$

де S_i - середня за день концентрація в i -тому пункті,

$\bar{S}_{\text{сез}}$ - середньосезонна концентрація в тому ж пункті,

N - число стаціонарних пунктів в місті.

Нормування на середньосезонну концентрацію дозволяє виключити вплив зміни загальної концентрації від року до року, що надає можливість використовувати для аналізу ряд спостережень за декілька років.

2. Коефіцієнти при членах розкладання на природні ортогональні функції (п.о.ф.). Концентрації домішок у повітрі, які вимірялися на стаціонарних постах у заданому місті, можна представити у вигляді функцій по простору і коефіцієнтів, які залежать тільки від часу:

$$S(x, t) - \bar{S}(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(t) \varphi_i(x). \quad (5.2)$$

У формулі:

$S(x, t)$ – концентрація домішки, яка залежить від x і моменту спостереження t ;

$\bar{S}(x)$ – середня концентрація, яка залежить від x , за сезон або півріччя; розраховується за даними спостережень кожного року окремо;

$\varphi_i(x)$ – система п.о.ф., які визначають за фактичними даними спостережень, вони є власними функціями (векторами) матриці коефіцієнтів коваріації між концентраціями домішок у різних точках міста;

$\alpha_i(t)$ – коефіцієнти, що відповідають функціям, які залежать тільки від часу t ;

N – кількість членів розкладання.

Кількість коефіцієнтів розкладання (як і кількість членів розкладання на п.о.ф.) дорівнює кількості стаціонарних постів, спостереження яких обробляються. Але найбільша кількість інформації про мінливість ЗП міститься у першому члені розкладання на п.о.ф., який описує одночасні коливання концентрацій по всьому місту. Коефіцієнт при 1-ому члені розкладання $\alpha_1(t)$ є узагальненим показником забруднення повітря у місті.

3. Ще один спосіб, який дозволяє охарактеризувати ЗП по місту в цілому. За матеріалами спостережень за тривалий інтервал часу (наприклад сезон) по кожному стаціонарному посту для кожної домішки, що вимірюється, відбирається певна кількість найбільш великих значень концентрації. Для віднесення даного вимірювання до випадків з великими концентраціями приймається: $S_i > a S_{cezi}$, де S_i – будь-яка концентрація; S_{cezi} – середня за сезон концентрація, розрахована окремо для кожного окремого поста, $a > 1$.

Показником щоденного забруднення повітря (ЗП) по місту в цілому при цьому з'являється параметр P , який розраховується:

$$P = \frac{m}{n}, \quad (5.3)$$

m - кількість спостережень на всіх постах у місті з $S_i > 1.5S_{cezi}$ на протязі однієї доби;

n - загальна кількість спостережень на цих постах, які були зроблені за цю добу. P змінюється від 0 до 1.

Враховуючи можливі випадкові коливання концентрації, а також помилки вимірювань, можна вважати, що P , як частотна характеристика є найбільш приємною для аналізу метеорологічних умов забруднення повітря. Так, значний зріст концентрацій на одному із стаціонарних постів, викликаний випадковими причинами буде мало впливати на значення параметра P , проте може помітно збільшити середню по місту концентрацію домішки. А не випадкові епізоди одночасного збільшення вмісту ШР у різних частинах міста, які визначаються метеорологічними умовами, достатньо добре виявляються при розгляданні щоденних значень параметру P .

Криві часового ходу α_1 та P повторюють одне одного. Достатньо високі коефіцієнти кореляції між P для окремих домішок та середньої по місту концентрації Q .

5.2 Вибір предикторів для синоптико-статистичних прогнозів

Зміни рівня забруднення повітря по місту в цілому визначаються низкою взаємопов'язаних факторів. Відомо, що розсіювання викидів в атмосфері відбувається в значній мірі за рахунок перенесення і турбулентного перемішування. Для обліку впливу цих факторів при статистичному аналізі інформації досить розглядати характеристики швидкості вітру і атмосферної стійкості.

Аналіз забруднення міського повітря в залежності від цих двох показників ускладнюється у зв'язку з формуванням в місті мікрометеорологічного режиму. У той же час поряд зі швидкістю перенесення і з турбулентним перемішуванням на рівень забруднення повітря в місті впливають і інші чинники, безпосередньо пов'язані з першими. До них відносяться напрям повітряних потоків, вимивання домішок опадами, їх акумуляція в туманах і хмарах, ступінь підйому

перегрітих газів, що залежить від температури повітря, інерційний фактор і ін.

Після визначення величини, яка буде виступати при прогнозуванні у якості предиктанта, дуже важливо визначити впливаючі фактори, які можуть бути предикторами в статистичних прогностичних моделях. Початкове число цих факторів або потенціальних предикторів, може бути достатньо великим. У якості предикторів виступають параметри, які описують процес переносу і розсіювання домішки (зазвичай метеорологічні характеристики) та інтегральні характеристики рівня забруднення в місті за попередню прогнозу добу (P' чи Q').

На підставі аналізу матеріалів спостережень у ряді міст [8] виявили сильний вплив на рівень забруднення атмосфери *інерційного фактору*. Тобто, значення показника фонових забруднень (P) істотно залежить від значення показника фонових забруднень (P') у попередні дні (коефіцієнт кореляції між P сусідніх днів 0,5-0,8). Інерційний фактор зв'язаний з «метеорологічною інерцією», тобто з тенденцією до збереження тих метеорологічних умов, що визначають рівень змісту домішок у повітрі. Тому дуже часто значення коефіцієнта лінійної кореляції (між P і P') дає можливість гарантувати наявність лінійного зв'язку між одним з предикторів P' та предиктантом P .

При виборі предикторів необхідно враховувати наступні головні фактори, що визначають формування рівня забруднення атмосфери:

- напрямок переносу домішок;
- швидкість переносу домішок;
- атмосферна температурна стратифікація і зв'язана з нею ступінь вертикального перемішування домішок;
- термічний стан повітряної маси, від якого залежить підйом перегрітих викидів і всього обсягу перегрітого над містом повітря;
- вимивання домішок опадами;
- акумуляція домішок в туманах;
- інерційний фактор;
- синоптична ситуація.

Для складання синоптико-статистичних прогнозів можна пропонувати у якості предикторів такі величини:

- T - температура повітря у поверхні землі, $^{\circ}\text{C}$;
- D - напрямок вітру у поверхні землі, градуси;

- V - швидкість вітру у поверхні землі, м/с;
- F - відносна вологість у поверхні землі, %;
- H_1 - верхня границя приземної інверсії, м;
- H_2 - нижня границя піднесеної інверсії, м;
- H_3 - верхня границя піднесеної інверсії, м;
- Y_{0-500} - вертикальний температурний градієнт у шарі 0 ...500 м, градусів на 100м;
- P' або Q' - інтегральна характеристики рівня забруднення в місті за попередню прогнозу добу.

Вищенаведений перелік предикторів для складання прогнозу може у кожному конкретному випадку мати іншу кількість та склад, який залежить від особливостей забруднення атмосфери кожного промислового міста. Всі метеорологічні характеристики, які отримані на різних висотах над поверхнею землі, також можуть бути предикторами в прогностичних схемах. Іноді із великого переліку предикторів потрібно виявити найбільш вагомі. Для цього існують спеціальні методики, наприклад, метод просіювання предикторів.

Головне для вибору предикторів - врахування характеру та тісноти зв'язку між ними та показниками забруднення атмосфери. Зв'язки між характеристиками забруднення повітря і метеорологічними параметрами являються складними та нелінійними. Щоб виявити фактори, які більш усього впливають на забруднення повітря, необхідно побудувати графіки зв'язку кожного предиктора з предиктантом. Аналіз кореляційних графіків дасть можливість виявити ті предиктори, які мають лінійний зв'язок з предиктантом. Ті ж предиктори, які не мають статистично значимого кореляційного зв'язку, можна включити до інших прогностичних схем (нелінійні методи) [11].

5.3 Прогноз метеорологічних умов забруднення атмосфери

Методика прогнозу метеорологічних умов забруднення (МУЗ) розроблена у Гідрометеоцентрі СРСР у 1984 р. Методика базується на використанні фактичного і прогностичного аеросиноптичного матеріалу, який є у розпорядженні синоптика на момент складання прогнозів погоди загального користування. Вона дозволяє оцінити підготовленість стану атмосфери до процесу накопичення чи розсіювання шкідливих домішок. Обов'язковою умовою при роботі з цією методикою є використання

фактичної та прогностичної карт AT_{925} (приблизно 750 м над поверхнею землі).

Метеорологічні умови забруднення у першому наближенні подають у вигляді комплексного показника:

$$МУЗ = Ц + H_{\text{тд}} + \bar{C}_{\text{пер}}, \quad (5.4)$$

де $Ц$ – циркуляційний фактор у вигляді типу синоптичної ситуації; визначається по прогностичним (фактичним) приземним картам;

$H_{\text{тд}}$ – товщина шару перемішування, яка обумовлена термічною та динамічною турбулентністю, визначається за прогностичними (фактичними) кривими стратифікації температури;

$\bar{C}_{\text{пер}}$ – середня швидкість вітру у шарі $H_{\text{тд}}$; визначається за прогностичними (фактичними) картами AT_{925} та AT_{850} та за приземною картою погоди.

При висоті шару перемішування $H_{\text{тд}}=0$ (приземна інверсія)

$$МУЗ = Ц + H_{\text{тд}} + C_0, \quad (5.5)$$

де C_0 – швидкість вітру біля поверхні Землі при $H_{\text{тд}}=0$; визначається за прогностичною або фактичною картою поля приземного тиску.

Кількість предикторів, що входять у (5.4), може бути і більшою (4 або більше).

Якщо метеорологічним предикторам умовно задавати дискретні значення від 3 до 10, тоді комплексний показник МУЗ буде змінюватися від 9 до 30. При використанні чотирьох (п'яти) параметрів МУЗ приймає значення відповідно: від 12 (15) до 40 (50). Чисельні характеристики кожного предиктора беруться відповідно до таблиці 5.1. З таблиці виходить, що чим менша товщина шару перемішування і чим слабкіший вітер, тим більший внесок їх у забруднення атмосфери. Менші цифри надані і тим типам синоптичних ситуацій, при яких визначалась найбільша повторюваність випадків високого забруднення. Чим менші значення МУЗ, тим більш сприятливі умови для забруднення.

Послідовність розстановки предикторів в таблицях, аналогічних табл.5.1, в різних районах території України може відрізнятися від наведених.

Таблиця 5.1 - Значення $\bar{C}$, $H_{\text{тд}}$, $\bar{C}_{\text{пер}}(C_0)$ і відповідні їм числові характеристики (на прикладі трьох предикторів)

Типи синоптичних ситуацій	Стан атмосфери			Числова характ-ка
	Н _{тд}		C _{пер} (C ₀) м/с	
		гПа (мб)		
Малорухомі антициклони та гребні, особливо які змістилися з півдня (тривалість ≥1,5 доби), Zn або депресія влітку	≤300	≤30	0-3	3
Розмиті поля (малоградієнтне поле підвищеного тиску) з вітром змінних напрямків (тривалість ≥1 доби)-підвищений рівень забруднення у теплий та холодний період	400	40	4	4
ПдЗ периферія Az – підвищений рівень забруднення у холодний період.				
1.Західна периферія антициклону (незалежно від швидкості вітру) при траєкторії із південно-східного сектору і адвекції тепла.	500	50	5	5
2. Розмиті поля (тривалість <1 доби.)	500	50	5	5
1.Передня частина циклону (западини) при траєкторіях із південно-східного сектору та адвекції тепла (теплий сектор циклона) підвищений рівень забруднення у теплий та холодний періоди.	600	60	6	6
2. Малорухомий невеликий за площею циклон, в якому циркулює одна і та повітряна маса	600	60	6	6
Периферія баричних утворень, тривалість ≥1,5 доби і вітер ≤4м/с (встановлюється ПдЗ периферія Az на ≥1,5 доби при слабкому вітрі).	700	70	7	7
Центри або периферії баричних утворень тривалість ≤1,5 доби і вітрі ≤ 4м/с	800	80	8	8
Центри або периферії баричних утворень будь-якої тривалості і вітрі ≥5м/с. ПдЗ периферія Az, яка руйнується.	900	90	9	9
1.Баричні утворення, які швидко рухаються, або перемежування западин та гребнів (хвильова діяльність), проходження фронтів Zn 2. Ультраполярне вторгнення повітряної маси	≥100 0	≥100	≥10	10

Чисельні характеристики кожного спрогнозованого метеопараметра підставляються у формулу (5.4) або (5.5) за якими обчислюється комплексний показник. Для центрального європейського району метеоумови високого забруднення характеризуються його значеннями для ночі 9-13, для дня 9-16. При остаточному висновку про небезпечність метеоумов здебільшого враховується і тривалість збереження цих умов. Виняток можуть складати “застійні” ситуації, які представлені типами 3 і 4 у табл.5.1.

Проте, для будь-якого міста такий висновок повинен бути підсилений статистичними даними.

Термінологія і оцінка виправданості прогнозів МУЗ. Числовий вираз комплексного показника МУЗ є основою для відповідної термінології прогнозу у формулюванні, зрозумілому споживачам. Умови, за яких вживається одна з трьох формулювань прогнозу, наведені в табл.5.2.

Таблиця 5.2 - Термінологія прогнозів за комплексним показником **МУЗ** без урахування вагових коефіцієнтів окремих предикторів

Термінологія прогнозів	Умови за яких надається формулювання прогнозу
Очікуються метеоумови високого забруднення – МУВЗ	На строк прогнозу і в попередні 12 та 24* години одержані значення МУЗ: на ніч 9-13: на день 9-16.
Очікуються метеоумови накопичення шкідливих домішок (короткочасні МУВЗ) – МУВЗ _{кр}	На строк прогнозу і в попередні 12 годин одержані значення МУЗ: на ніч 9-13: на день 9-16.
Метеоумови високого забруднення не очікуються – МУВЗ _{н/о}	І. На строк прогнозу одержані МУЗ: для ночі (дня) дорівнюють та більші 14 (17)

*При застійних ситуаціях (тип 3 та 4 табл. 5.1) урахування тривалості МУЗ у ряді міст може бути необов'язковим.

При оцінюванні прогнозів МУЗ використовується три градації виправдання: 100%, 50% та 0% (табл.5.3). Попередження випадків

метеоумов високого забруднення (МУВЗ) розраховується за цією ж таблицею, але з урахуванням фактично спостережених випадків МУВЗ.

Таблиця 5.3 - Оцінка виправданості прогнозів МУЗ

Текст прогнозу	Виправданість (%) прогнозів МУЗ		
	100	50	0
1.Очікуються метеоумови високого забруднення	МУВЗ	МУВЗ _{кр}	МУВЗ не було
2.Очікуються метеоумови накопичення шкідливих домішок (короткочасні МУВЗ)	МУВЗ _{кр}	МУВЗ _з	МУВЗ не було
3.Метеоумови високого забруднення не очікуються	МУВЗ не було	МУВЗ _{кр}	МУВЗ

Для оцінки прогнозів використовується діагностичний аеросиноптичний матеріал, по якому, використовуючи формули (5.4-5.5), також визначається комплексний показник МУЗ. Цей показник зіставляється потім з його прогностичним значенням.

Взаємодія гідрометеоцентрів з виконками місцевих рад.
Порядок взаємодії гідрометеоцентрів з виконками облдержадміністрацій визначається Положенням, яке затверджується з обох сторін.

Гідрометцентр на підставі методики, яка була коротко викладена раніше, оцінює підготовленість атмосфери до накопичення чи розсіювання шкідливих домішок і робить висновки про небезпечність метеорологічних умов, який разом з необхідними метеорологічними параметрами передається до виконкам місцевих рад.

У виконкомі на основі висновку гідрометеоцентру та прогностичних схем, які розроблені за іншими методиками для міста, а також даних про фактичне забруднення атмосфери, прогнозуються рівні ЗА по місту у цілому та від окремих джерел.

У випадку якщо фонове ЗА близьке до критичних значень та очікуються метеоумови високого забруднення, на підприємства передаються попередження з метою прийняття заходів щодо зменшення викидів шкідливих домішок. Моніторингова служба в ці періоди здійснює контроль за проведенням підприємствами необхідних заходів.

Також споживачами прогностичної інформації є підрозділи МОЗ України, які займаються санітарно-епідеміологічними питаннями; Департамент патрульної поліції; підрозділи Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України.

5.4 Прогнозування забруднення повітря методом лінійного регресійного аналізу

Якщо існує лінійний зв'язок між окремими предикторами та предиктантом, при будівництві прогностичної моделі використовують метод лінійного регресійного аналізу. Виправдовуваність прогнозів по даному методу може скласти для деяких міст 93% на залежному матеріалі і 80% - на незалежному. Суть методу складається в знаходженні предикторів, які мають з предиктантом найбільш значний кореляційний зв'язок. Потім частіше усього методом найменших квадратів (МНК) розраховують коефіцієнти регресії і будують лінійне регресійне рівняння.

Регресійну прогностичну модель частіше усього будують методом покрокової регресії.

Метод покрокової регресії. Вивчення процесів, які ідуть в атмосфері та обумовлюють переніс і дифузію домішок у граничному шарі, дає можливість визначити фактори, які можуть бути предикторами в статистичних прогностичних моделях. Початкове число цих факторів або потенціальних предикторів, може бути достатньо великими. Проте остання обставина не поліпшує розраховану схему, оскільки збільшує дисперсію помилок. Це пов'язано з тим, що матриця кореляції, на якій заснована система нормальних рівнянь знаходиться емпірично з використанням експериментальних даних, які утримують помилку вимірювань. Незалежні предиктори не вносять суттєвої помилки в параметри моделі, так як у цьому випадку матриця кореляції добре обумовлена. Проте в зв'язку з тим, що серед великої кількості потенціальних предикторів є велике число статистично зв'язаних один з одним, матриця кореляції предикторів виявляється погано обумовленою. У цьому випадку помилки вимірювань, які утримуються у вихідних даних, суттєво впливають на правдивість оцінок параметрів моделі, а отже, і на адекватність моделі процесу. Таким чином, при будівництві прогностичних схем по методу лінійної регресії

необхідна наявність лінійного зв'язку хоч би з одним метеорологічним параметром.

Виникає задача відбору з складу потенційних предикторів таких, які би досить повно відбивали вплив процесів, які ідуть у граничному шарі атмосфери, на розсіяння шкідливих домішок.

Процедура, яка дозволяє вибрати оптимальний склад статистично зв'язаних предикторів, прийнято називати просіюванням предикторів. Існує декілька методів. Самий поширений з їх – метод покрокової регресії (МПР). Наведемо скорочений алгоритм МПР [9].

Складається матриця $\tilde{X}(n \times m)$ вихідних даних розміром $n \times m$, де m – кількість предикторів плюс предиктант, n – кількість рядків або векторів предикторів. Розраховується середнє значення кожного стовпчика матриці $\tilde{X}$:

$$\overline{\tilde{X}}_i = \frac{1}{n} \sum_{L=1}^n \tilde{X}_{iL}; \quad i = \overline{1, m} \quad L = \overline{1, n} . \quad (5.6)$$

Далі знаходиться середнє квадратичне відхилення кожного стовпчика матриці:

$$\tilde{\sigma}_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{L=1}^n (\tilde{X}_{iL} - \overline{\tilde{X}})^2} . \quad (5.7)$$

Кожне значення вихідної матриці центрується та нормується на середнє квадратичне відхилення:

$$X_{iL} = \frac{\tilde{X}_{iL} - \overline{\tilde{X}}}{\tilde{\sigma}_i} . \quad (5.8)$$

Ця процедура необхідна для приведення усіх значень матриці до одного порядку. Розраховується середнє та середньоквадратичне відхилення для нової центрованої та нормованої матриці X по формулах (5.6) та (5.7). Для матриці X знаходиться приєднана матриця кореляції $R_{xy}(m \times m)$, у полі якої – коефіцієнти кореляції між всіма предикторами, а останній стовпчик - це коефіцієнти кореляції предиктанту Y з кожним із предикторів X :

$$R_{xy} = \begin{pmatrix} 1 & r_{x1x2} & r_{x1x3} & \dots & r_{x1y} \\ r_{x2x1} & 1 & r_{x2x3} & \dots & r_{x2y} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{yx1} & r_{yx2} & r_{yx3} & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.9)$$

Потім проводиться аналіз останнього стовпчика матриці R_{xy} та вибирається найбільше значення коефіцієнту детермінації

$$\max[r_{yxi}^2]; \quad i = \overline{1, m}. \quad (5.10)$$

Предиктору, який має максимальний r^2 , привласнюється номер один. На другому кроці будується за допомогою МНК рівняння регресії

$$\hat{y}^{(1)} = A_1 X_1, \quad (5.11)$$

та знаходиться перша різниця

$$\xi_{1i} = y_i - \hat{y}_y^{(1)}. \quad (5.12)$$

Далі розраховується частковий коефіцієнт кореляції між ξ_{1i} та всіма предикторами, що залишились, тобто

$$r_{\xi_{1i} X_i} \quad i = \overline{2, m}. \quad (5.13)$$

Другий значний предиктор вибирається з умови (5.10) і йому привласнюється другий номер. Будується рівняння регресії з двома предикторами по МНК.

Процедура продовжується до тих пір, поки коефіцієнт кореляції значний. Його значність оцінюється по критерію Ст'юдента (t).

У результаті будується рівняння регресії вигляду

$$\hat{y} = A_1 X_1 + A_2 X_2 + \dots + A_k X_k + A_0, \quad (5.14)$$

яке утримує k статистично значних предикторів, які вичерпують основну частину дисперсії предиктанту.

Зв'язки між забрудненням повітря і метеопараметрами являються складними та нелінійними. Це заважає використанню методу лінійної регресії для практичних схем. Але в деяких випадках його використання можливе та доцільне. Умовою його використання з'являється наявність достатнього лінійного зв'язку між характеристиками забруднення повітря та окремими предикторами. Між предикторами лінійного зв'язку не повинно бути.

Один значний коефіцієнт лінійної кореляції (між P і P') гарантований. Необхідна наявність лінійного зв'язку між показником ЗА і хоча би одним параметром. Коефіцієнти регресії розраховуються за МНК. На рівні значності 5% беруть найбільше значення.

Для підвищення ефективності схем прогнозу ЗП методом множинної лінійної регресії можливо попереднє виключення нелінійного зв'язку між характеристиками забруднення повітря та метеопараметрами. Для цього по матеріалам спостережень в кожному місті виконують перетворення предикторів з обліком справжнього вигляду зв'язків між ними та предиктантом.

Перетворення міститься в тому, що за допомогою кривих або таблиць залежностей показника забруднення повітря (P , Q , α) від окремих метеопараметрів, побудованих по використаному для розробок матеріалу спостережень, кожне значення предиктора замінюється на відповідне йому значення характеристики ЗП (середні P , Q , або α_1). Зв'язок перетворених предикторів з предиктантами близький до лінійного [8, 9].

Рівняння регресії може мати вигляд:

$$Q = a_0 + a_1 Q' + a_2 Q(T_0) + a_3 Q(\Delta T') + a_4 Q(v_0). \quad (5.15)$$

Ефективність прогностичної схеми підвищується, якщо в якості предиктора використовувати кількісно синоптичну ситуацію S_n . Виправдовуваність може досягати 95%, а аномально високого забруднення ($P \geq 0,5$) - 100%.

Таким чином, спосіб визначення нелінійності зв'язків між ЗП та метеопараметрами дозволяє врахувати в схемах прогнозу, розроблених по методу множинної лінійної регресії, справжній вигляд залежності. Це визнано задовольняє ефективність практичних схем. Але цей метод гірше ніж метод графічної регресії, тобто не дозволяє врахувати неоднозначність

зв'язків, тобто різний характер зв'язку між ЗП та будь-якими предикторами при різних значеннях іншого предиктора.

5.5 Прогнозування забруднення повітря методом розпізнавання образів

Серед нелінійних методів прогнозування забруднення повітря є одна з простіших схем - метод розпізнавання образів (МРО). МРО складається з визначення схожості конкретної ситуації (групи предикторів) з ситуацією, характерною для якої-небудь групи забруднення (високого, підвищеного, зниженого). Пропонується 3 групи значень параметру P :

I група – $P > 0,35$;

II група – $0,35 \geq P > 0,20$;

III група - $P \leq 0,20$.

У залежності від рівня забруднення атмосфери можливі інші варіанти поділу P на групи [2, 8].

Схожість ситуацій тут встановлюється по “відстані” між ними. Під ситуацією розуміють набір характеристик (предикторів), які супроводжують РЗП у деякий фіксований момент часу. Такими характеристиками є значення метеопараметрів і показники ЗА в місті у попередні моменти часу.

Ситуація з деякими характеристиками (предикторами) $X_1, X_2, \dots, X_n$ може бути представлена як точка у n -мірному просторі (фазовому просторі ситуацій). Якщо значення РЗА поділити на декілька груп, тоді ситуації у фазовому просторі також поділяються на 3 групи; I – відповідна великому вмісту домішок у повітрі; II група – середньому; III – малому. У середині групи I відстані між точками X і Y можна визначити

$$\rho_I^2(X, Y) = \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - Y_i)^2}{(\sigma_i^I)^2}, \quad (5.16)$$

де $(\sigma_i^I)^2$ - дисперсія у групі I уздовж i -ої осі, тобто предиктора. Аналогічні співвідношення використовуємо у групі II і III.

Під відстанню від деякої точки f до групи I приймається відстань від f до центру ваги цієї групи, тобто до точки з координатами:

$$\bar{X}_i^I = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m X_{ij}, \quad (5.17)$$

де підсумовування проводиться по усім m значенням кожного предиктора, який входить до складу групи I. Інакше кажучи, $\bar{X}_i^I$ - середнє значення i -ої характеристики (предиктора) у даній групі. Тоді відстань від точки f до центру ваги групи I визначається

$$\rho_I^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X}_i^I)^2}{(\sigma_i^I)^2} \quad . \quad (5.18)$$

$$\text{Тут} \quad (\sigma)_i^I = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (X_{ji} - \bar{X}_i^I)^2, \quad (5.19)$$

$j = \overline{1, m}$ - перебір по усім точкам поданого предиктора.

$i = \overline{1, n}$ - належність до того або іншого предиктора.

Аналогічно визначається відстань від f до груп II і III. Приймається, що точка f у фазовому просторі ситуацій належить до тієї групи, відстань від якої мінімальна. Прогностична схема зводиться до визначення середніх значень і дисперсій предикторів відповідних кожній групі забруднення (P) – високому, підвищеному або зниженому P . При складанні прогнозу обчислюються “відстані” від прогнозованої ситуації до отриманих груп, і цю ситуацію відносять до групи, до якої відстань мінімальна (рис. 5.1). У теперішній схемі прогностична значність предикторів визначається різницею як їх середніх значень, так і дисперсій. Використання даних про дисперсії предикторів дозволяє при прогнозі додатково враховувати реальний характер залежностей між ЗП та метеоумовами. З формули (5.18) видно, що зі збільшенням дисперсії росте участь відповідного предиктора у створенні рівня концентрацій. Предиктори з малими значеннями дисперсії збільшують загальну відстань. Важлива різниця дисперсій по групам. При рівних значеннях ненормованих різниць точка відноситься до тієї групи, де σ велике. Або точка у фазовому просторі відноситься до групи з маленькою дисперсією предикторів, якщо геометрична відстань від точки до центру ваги поданої групи мала.

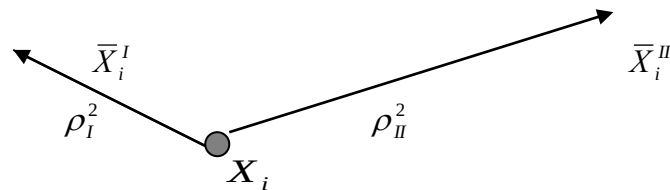


Рисунок 5.1 – Схема вибору віднесення предиктору X_i до I або II групи забруднення повітря за найменшою відстанню

Схема була реалізована в багатьох містах у зимовий та літній сезони. Розподіл P по групах іноді був таким: I група - $P > 0.25$; II - $0.25 \geq P > 0.15$; III - $P \leq 0.15$. У вигляді предикторів були P' ; v_0 – швидкість вітру на рівні флюгеру; v – швидкість вітру на висоті 500м від рівню Землі; $\Delta T = T_0 - T_{925 \text{ мПа}}$; T_0 – температура у землі; $\Delta P / \Delta n$ – градієнт приземного тиску (гПа / 1⁰ меридіану); H_2 – нижня межа піднесеної інверсії (при приземній інверсії $H_2 = 0$). У більшості випадків різниця середніх різних груп суттєва, або суттєва різниця дисперсії. Прогностична схема ефективна як по використаному (на якому проводився етап вивчення), так і по незалежному матеріалу. Виправданість для усіх міст 73-75%. На незалежному матеріалі 70-76%.

Достоїнстю поданого методу є найкраще, ніж у методі лінійної регресії, урахування реального вигляду зв'язків між показниками ЗП і МУ. Але при складних зв'язках (наявність 2-х максимумів ЗП в залежності від метеофакторів) до однієї групи надходять суттєво різні значення предикторів. Тому при використанні поданого методу найкраще вибирати такі предиктори, з якими зв'язок ЗП є монотонний.

5.6 Метод послідовної графічної регресії

Метод послідовної графічної регресії (МПГР) відноситься також до нелінійних методів. МПГР дозволяє найбільш повно врахувати відомі закономірності і виявлені зв'язки між концентрацією домішок у повітрі та метеопараметрами у конкретному місті.

Реалізація методу.

1 етап – будуються попередні графіки на кожному з котрих представляються залежності предиктанта від двох предикторів.

2 етап – проводиться попарне об'єднання графіків.

3 етап – отримання остаточного графіка, на якому предиктант - функція всіх предикторів. Кількість предикторів не обмежується [2, 8].

Для вибору та включення до схеми прогнозу предикторів важлива наявність у будь-якому вигляді зв'язку між ними та ЗП по матеріалах спостережень в даному місті. Можна відмітити, що вигляд зв'язку значення не має, на відміну від методу розпізнавання образів, де наявність складного зв'язку, наприклад, бімодального, виключає можливість використання предиктору. У деяких випадках зв'язок між ЗП та окремим параметром має нечіткий вираз, але він краще виявляється якщо його розглядають при заданих значеннях іншого параметру (наприклад, залежність ЗП від швидкості вітру при різних становищах термічної стійкості атмосфери – метод послідовної графічної регресії дозволяє прослідкувати такий неоднозначний зв'язок).

Ніяких обмежень до вибору пар предикторів у МПГР не існує. Але з обліком фізичних думок бажано відокремити два предиктора так, щоб характер зв'язку між ЗП та одним з них залежав від значення іншого (наприклад: температура повітря T і швидкість вітру v ; висота приземної термічної інверсії H_{nz} і P' та інше).

Прогностична схема по МПГР. Нехай попередній аналіз виявив зв'язок предиктора з 4-ма предикторами. Для прогнозування P за дневні строки (7,13 и 19 годин) до схеми включають v_0 за 6 годин; v_1 і ΔT_{0-750} – за радіозондом у строк 03 години.

Один графік будують відкладаючи по осям координат v_0 і ΔT , так як характер залежності ЗП від швидкості вітру визначається стійкістю атмосфери. Інша пара предикторів v_1 і P' . Тоді предиктант представимо як функцію:

$$P = F [\Pi_1(v_0, \Delta T), \Pi_2(v_1, P')]. \quad (5.20)$$

На кожному з попередніх графіків (рис. 5.2 та 5.3) в залежності від значень предикторів у відповідних точках перехрещення перпендикулярів пишуться значення параметру P за весь строк спостережень. Наступне завдання – проведення ізоліній ЗП: у чистому вигляді це неможливо, так як 2 предиктора однозначно не визначають РЗП. В ідеалі графіки поділяються на квадрати, в кожному з яких визначається характеристика ЗП – середні значення P або повторюваність Π підвищених значень P , а потім проводяться ізолінії цих характеристик. Реально розподіл графіків на

квадрати не роблять із-за недостатнього числа значень предиктанта у деяких частинах графіку. Задача спрощується, так як з попереднього аналізу матеріалів спостережень у даному місті встановлюється характер зв'язків, а значить, конфігурація областей на графіках, де повинні переважати високі і низькі значення предиктанта.

Таким чином розрахунок характеристик ЗП проводиться у відокремлених областях раніше відомої форми. Зручно проводити ізолінії повторюваності $[П]$ підвищених значень P , наприклад, випадки з $P \geq 0,3$. Але може бути і $P > 0,25$.

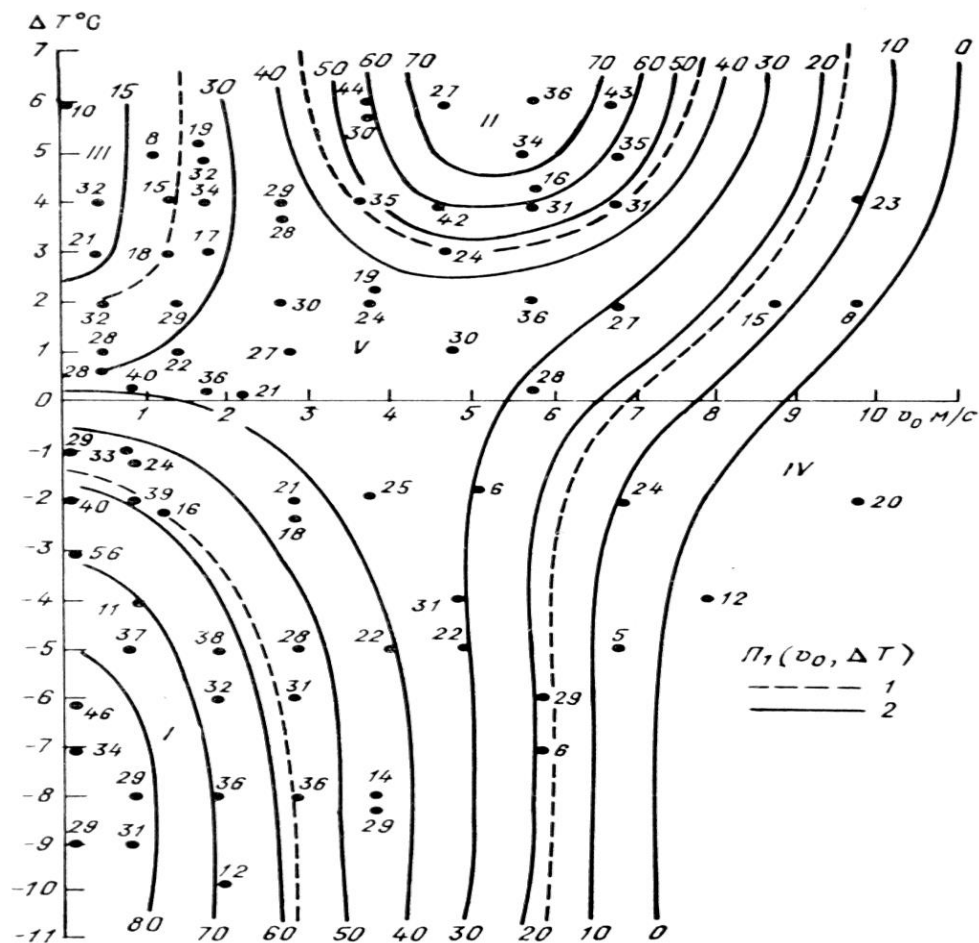


Рисунок 5.2 - Перший попередній графік $\Pi_1(v_0, \Delta T)$ [8]

На першому попередньому графіку відокремлено 5 областей різних $\Pi_1(v_0, \Delta T)$ підвищене ЗП при сполуці дуже слабкого вітру та інверсії у нижньому шарі (I) і при сполуці вітру 5-6 м/с і позитивних значень ΔT (область II). Область з низьким ЗП виявляється: при відносно сильному вітрі, особливо у випадку нестійкої термічної стратифікації (область IV), і

при сполучі дуже слабкого вітру і нестійкій термічній стратифікації (обл. III). Між ними – область V проміжна. При відокремленні областей врахували фактичне розповсюдження значень P . В область I і II $P_1 \approx 70\%$, в область III $P_1 \approx 20\%$, в область IV $P_1 = 0$, в область V $P_1 \approx 30\%$ (P_1 – імовірність попадання в ці області підвищених значень P).

II-й попередній графік – проведені ізолінії $P_2(v_1, P)$. Попередньо було встановлено, що в середньому ЗП знижується з посиленням вітру на рівні 925 гПа і при дуже малих v_1 (рис. 5.3).

P збільшується з збільшенням P' . На графіку відокремлені 3 області зі значенням $P_2(v, P')$ з імовірністю підвищених P в них 80, 50 та 10% та проведені ізолінії P_2 .

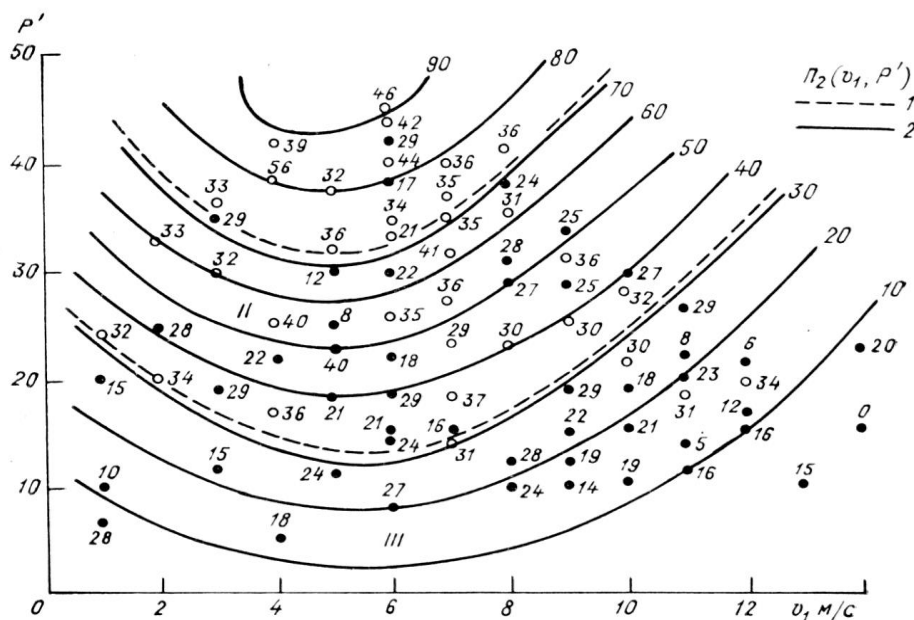


Рисунок 5.3 – Другий попередній графік $P_2(v_1, P')$

Потім для кожного дня використаного рядка спостережень за щоденними значеннями v_0 , і ΔT були отримані P_1 , а по v_1 і P' – P_2 . Значення P_1 і P_2 є координатами остаточному графіку. Значення P_1 і P_2 можуть розглядатися як комплексні предиктори, вони встановлюються з урахуванням реального виду зв'язків між ЗП і метеопараметрами з урахуванням фактору в конкретному місті. Кореляція P з новими комплексними предикторами (P_1 і P_2) виявляється достатньо тісною, що дозволяє на остаточному графіку проводити ізолінії предиктанту P . Процедура слідуюча: відокремлюються 3 області, відповідні 3 групам P).

P збільшується зі збільшенням Π_1 і Π_2 , тому вигляд ізолій як на остаточному графіку (рис. 5.4). Области відокремлюються таким чином, щоб виправдовуваність прогнозів груп ЗП за використаним матеріалом була максимальною. Ізолія 0,35 розділяє I і II гр.; 0,20 – II і III групи ЗП. Решта ліній паралельна.

Таким чином прогностична схема, яка розроблена за МПГР, дозволяє прогнозувати P . Головне тут - виділення на графіку 3 областей відповідних груп високого, підвищеного, зниженого РЗА.

Урахування реально існуючих зв'язків між ЗП і МУ, а також попереднього РЗА – головна перевага даного методу. При графічному представленні фактичних даних у деякій ступені враховуються невідомі закономірності. При цьому не робиться ніяких попередніх припущень у вигляді залежностей.

Схема була реалізована за матеріалами спостережень у Донецьку. Тут відсутні аерологічні спостереження. Після попереднього аналізу були вибрані предиктори: T_0 , v_0 , P' , ΔH_{850} .

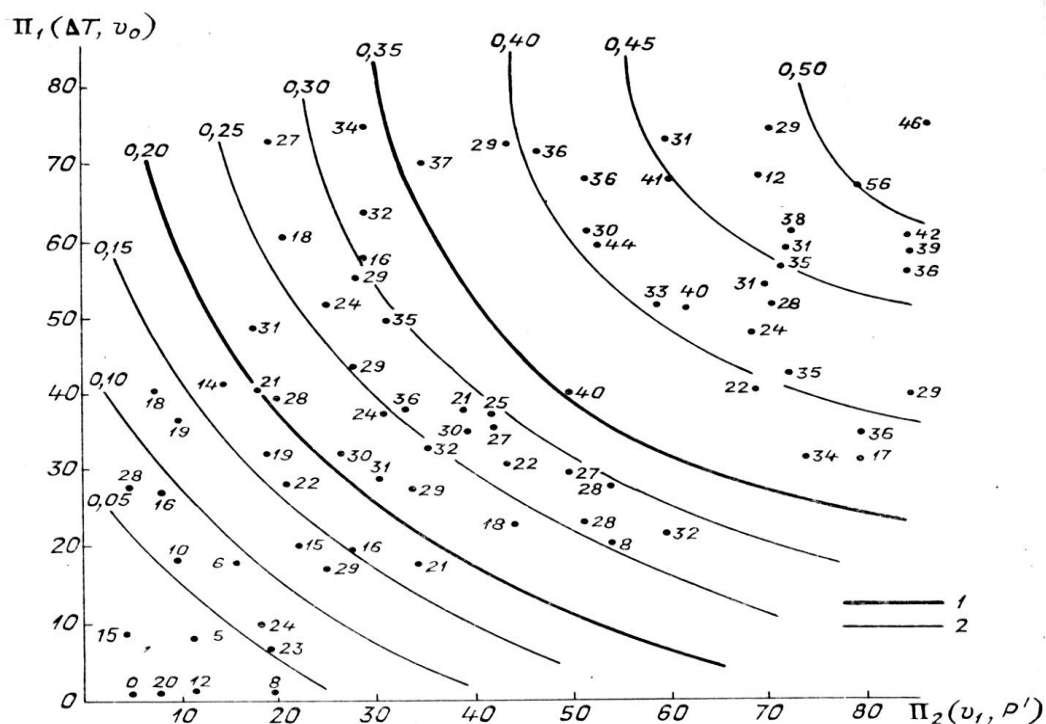


Рисунок 5.4 – Остаточний прогностичний графік за МПГР

Пономаренко за даними спостережень у Києві побудував графіки окремо для випадків приземної інверсії, піднесеної інверсії та відсутності інверсії у нижньому шарі атмосфери.

Побудовані за фактичним матеріалами графіки є прогностичними. Прогностична схема ЗП по місту в цілому за МПГР перевірялась на незалежному матеріалі в різних містах . Було складено близько 1000 прогнозів груп ЗП. Виправданість 80-90%, що перевищує виправданість випадкових прогнозів, і на 10-20% перевищує успішність інерційних прогнозів. Висока виправданість прогнозів РЗА І групи ($P > 0.35$): на залежному матеріалі - 78% (72/% на незалежному). Прогностична схема пройшла масові випробування і дуже успішно використовується в практиці прогнозу ЗП.

Питання для самоконтролю:

1. Назвіть терміни, прийняті у чисельних та синоптико-статистичних прогнозах.
2. Що таке предиктант та предиктори?
3. Які основні принципи розробки питань прогнозу забруднення повітря в цілому по місту?
4. Як здійснити вибір предиктанта для статистичних схем прогнозу забруднення повітря у місті ?
5. Які існують статистичні методи прогнозу забруднення атмосфери?
6. У чому суть узагальнених інтегральних показників забруднення атмосфери у місті?
7. Як здійснити вибір предикторів до статистичного прогнозу?
8. Який комплексний показник прогнозують у методі метеорологічних умов забруднення атмосфери (МУЗ)?
9. У чому суть методу прогнозу на основі множинної лінійної регресії?
10. У чому суть прогнозування забруднення повітря методом розпізнавання образів?
11. Назвіть порядок прогнозування забруднення повітря методом послідовної графічної регресії.

6 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ

6.1 Загальні принципи розробки прогнозу забруднення атмосфери

Метеорологічні умови забруднення є основою для прогнозування ЗА, тому що задача полягає в прогнозі і запобіганні ВРЗ, створюваних саме при НМУ.

Запобігання збільшенню ЗА, обумовленого різким зростанням викидів, - це чисто технічне питання. Завдання метеорологічного забезпечення - своєчасне виявлення і сповіщення про збільшення концентрацій і виявлення джерел, що призводять до зростання концентрації.

Складнощі прогнозування полягають в урахуванні різнопланових факторів:

- в місті багато джерел з різними характеристиками, для яких несприятливими можуть бути істотно різні МУ;
- залежність ЗА по місту в цілому від МУ - складна і неоднозначна;
- РЗА визначаються багатьма факторами.

Дослідження показали необхідність розробки двох видів прогнозу забруднення АП (подолання першої складності): в районі окремих джерел і по місту в цілому. Облік різноманіття характеристик викидів зводиться до вирішення задачі ЗА для кожного джерела окремо. При цьому охоплюється велика кількість розташованих в місті об'єктів і в той же час використовуються прості співвідношення для одиночних джерел.

Методи прогнозування ЗП по місту в цілому засновані на результатах аналізу впливу МУ і синоптичних умов на концентрації домішок. Облік конкретних особливостей: прогностичні схеми складаються за матеріалами спостережень в кожному місті окремо по сезонах, а також (по можливості) по частинах діб. Таким чином, враховуються зміни протягом року особливостей викидів ЗР в атмосферу, кліматичні та мікрокліматичні умови в їх річному і добовому ході.

Для якнайповнішого врахування фізичного процесу ЗП в місті при розробці питань його прогнозу слід враховувати можливу асинхронність зв'язків між концентрацією і метеопараметрами: спочатку встановлюються

певні МУ і тільки через деякий час формується відповідний їм РЗА. Ступінь асинхронності може бути різною.

При використанні в прогностичних схемах метеопараметрів за попередній інтервал часу може відпасти необхідність прогнозування предикторів і, таким чином, буде виключена можлива помилка їх прогнозу.

Один з варіантів схем прогнозу, широко застосовуваний на практиці, включає метеорологічні предиктори в ранні ранкові години (3-6 год. за місцевим часом – це дані нічного радіозондування атмосфери, і показник ЗП за першу половину дня і за день).

Інший варіант: використовуються предиктори за денні години (15 год.) і показник ЗП за другу половину дня і за вечір.

У разі надкороткострокових прогнозів (8-10 год.) розглядаються виміряні метеопараметри. Для уточнення прогнозу можуть використовуватися варіанти прогностичних схем із застосуванням складних фізичних характеристик, що не передбачені існуючими методами (число Річардсона, коефіцієнт турбулентного обміну та ін.).

При включенні в схеми прогнозу в якості предиктора вихідного значення параметра Р в неявному вигляді враховується асинхронність зв'язку між концентрацією і МУ, які, головним чином, визначають РЗА в місті.

Існує варіант прогностичних схем з асинхронними предикторами віддаленими від терміну відбору проб повітря на 6-24 години.

Важливою проблемою при вирішенні задачі прогнозу ЗА в місті є врахування складного характеру зв'язків між концентрацією і метеофакторами. При розробці прогностичних схем велике значення має вибір методу, який дозволив би максимально врахувати реальний вигляд зв'язків.

Необхідно одночасно складати обидва види прогнозу. Але якщо для одиночних джерел спосіб прогнозу може всюди застосовуватися в чистому вигляді, то для прогнозу ЗА по місту в цілому необхідно попередньо виконати обробку фактичних матеріалів спостережень по конкретному місту за попередні роки.

6.2 Оцінка ефективності методів прогнозу забруднення повітря

Ефективність методів прогнозу забруднення повітря (ЗП) можливо встановити шляхом розрахунку коефіцієнта кореляції r між прогностичними та розрахованими за фактичними даними значеннями узагальненого показника ЗП у місті. Така оцінка може бути виконана тільки для тих методів, які дозволяють передбачати значення предиктантів (параметрів P и Q), для методів послідовної графічної регресії та множинної лінійної регресії.

Метод розпізнавання образів дозволяє прогнозувати лише групу забруднення у місті, тому його ефективність не може бути оцінена за допомогою r .

Ефективність методу прогнозу ЗП можливо вважати задовільною, якщо $r \geq 0,7$ – у цьому випадку метод враховує не менш половини загальної мінливості предиктора.

Проте, у практичній роботі частіше враховують не очікуване значення параметра ЗП у місті, а очікувану групу забруднення - високе (I), підвищене (II), знижене (III). Це і було покладено у основу оцінки прогнозів ЗП у місті.

Перевірка виправданості прогнозів забруднення повітря по місту у цілому проводиться відповідно до табл. 6.1.

Таблиця 6.1 - Оцінка виправданості прогнозів забруднення повітря по місту у цілому

Група (клас) забруднення	Прогностична група	Повторюваність кожної групи ЗП, π %	Градація значень параметру P , при яких прогноз вважається виправданим	Повторюваність кожної оцінки прогнозу, ϕ %
I	$P > 0,35$	10	$P \geq 0,30$	20
II	$0,2 < P \leq 0,35$	40	$0,17 \leq P \leq 0,38$	60
III	$P \leq 0,20$	50	$P \leq 0,25$	65

Критерії для розподілу значень параметру P на групи та оцінки прогнозів, які представлені у таблиці 1, були запропоновані при підготовці

матеріалів для впровадження розроблених методів з урахуванням того, що повторюваність I, II, III груп складає приблизно 10, 40 та 50%. Проте в різних містах статистичний розподіл P неоднаковий, тому іноді можна рекомендувати у I групу включати $P \geq 0.30$ чи 10% найбільших значень P . Як критерій для розподілу II та III груп приймається середнє значення параметру P .

Аналогічний підхід використовується для розподілу на групи нормованих середніх по місту концентрацій Q . Наприклад, з урахуванням статистичного розподілу Q при розробці схеми прогнозу ЗП розділення на групи можна провести так: I група – значення $Q > 1,5$ (прогноз вважається виправданим при $Q > 1,3$); II група $1,5 \geq Q > 1$ ($1,7 \geq Q \geq 0,8$); III група значення $Q \leq 1$ ($Q \leq 1,2$).

Для оцінки ефективності прогностичної схеми слід виходити з перевищення виправданості прогнозів груп ЗП над повторюваністю градацій параметру P , при яких прогноз був виправданим. Так, повторюваність градації, при якій виправдовується прогноз I групи ($P \geq 0,30$) складає близько 15%. Фактично виправданість таких прогнозів перевищує 80%.

Оцінка виправданості прогнозів I групи може проводитись на етапі випробування розроблених схем та у випадку, коли відомо, що підприємства не перейшли до здійснення заходів по регулюванню викидів. Якщо ж регулювання викидів проводиться і визначає зниження ЗП, тоді для оцінки такого прогнозу значення P , що фактично спостерігалися, замінюють його можливими значеннями, які відповідають здійсненому комплексу метеорологічних факторів.

Суттєва оцінка підвищення виправданості методичних прогнозів над випадковими. При цьому виправданість випадкових прогнозів U_0 , згідно Г.А. Багрову, може дорівнювати:

$$U_0 = \varphi_1 \pi_1 + \varphi_2 \pi_2 + \varphi_3 \pi_3, \quad (6.1)$$

де $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – повторюваність кожної з трьох градацій параметру P ;

π_1, π_2, π_3 – повторюваність кожної групи ЗП.

Як вже відзначалось, повторюваність I групи ЗП у місті складає у середньому 10%, II групи – 40%, III – 50%. Можна припустити, що частота прогнозів цих груп приблизно така ж. Тоді $\pi_1 = 0,10$; $\pi_2 = 0,40$; $\pi_3 = 0,50$. Якщо врахувати прийняті допуски для оцінки прогнозу (дивись табл.6.1),

тоді $\varphi_1 = 0,2$; $\varphi_2 \approx 0,6$; $\varphi_3 \approx 0,65$. За цим виправданість випадкових прогнозів U_0 складає приблизно 58%.

Як міру успішності можна використовувати запропоновану Н.А. Багровим величину:

$$H^* = \frac{U - U_0}{1 - U_0}, \quad (6.2)$$

де U_0 – виправданість прогнозу (в частках одиниці). Значення H^* для ефективних прогнозів не повинно бути менше 0,2-0,3. Для випадку прогнозу ЗП по місту у цілому H^* суттєво переважає вказане значення. В середньому для багатьох міст $U \approx 0,85$. Тоді $H^* \approx 0,67$.

Оцінки прогнозів ЗП від окремих джерел неможливо проводити за значеннями концентрації. При великій кількості різних джерел викидів у місті важко виділити концентрації, які обумовлені конкретним джерелом. Тому у цьому випадку прогнози оцінюються відповідно з виправданістю прогнозів метеоелементів, які входять до встановлених несприятливих комплексів.

Після переходу до оперативного прогнозування ЗП основне значення приймає оцінка ефективності прогнозів по ступеню реального зменшення кількості викидів та пониження концентрацій домішок у цьому повітрі під час несприятливих метеоумов (НМУ). Для виконання такої оцінки враховуються заходи, які реально виконувались на об'єктах у несприятливий час, і якщо це можливо, кількісно оцінюються ступень пониження викидів та зменшення розрахованих концентрацій домішок. Проте найбільш суттєвим показником ефективності робіт по прогнозуванню ЗП є фактичне пониження приземних концентрацій за рахунок регулювання викидів.

6.3 Організація робіт по прогнозуванню забруднення повітря. Складання попереджень

З досвіду прогнозування ЗП у ряді міст і практичного проведення заходів по забезпеченню чистоти повітряного басейну під час НМУ розроблені організаційні питання.

Організація прогнозування у будь-якому місті починається з виконання розробок за місцевими матеріалами. Вивчаються зв'язки між концентраціями та метеоумовами (МУ) формулюються прогностичні правила, встановлюються комплекси метеопараметрів (МП), при яких можуть утворюватися високі рівні забруднення повітря (ВРЗП) за рахунок викидів конкретних джерел, складаються статистичні схеми для прогнозу забруднення по місту у цілому. Потім проводяться випробування і у випадках позитивних результатів схеми упроваджуються у практику. Але їх упровадження не зупиняє роботи, так як схеми можна та необхідно удосконалювати.

Таким чином, обов'язок спеціалістів по прогнозуванню ЗП – **виконання регіональних розробок.** Обидва види прогнозу ЗП – у районі окремих джерел і по місту у цілому - складаються паралельно. Прогнози даються щоденно 2 рази на день: наприкінці дня – на наступний день, у ранці – уточнений прогноз на поточний день.

Споживачами прогностичної інформації є підприємства, які здійснюють регулювання викидів; підрозділи МОЗ України, які займаються санітарно-епідеміологічними питаннями; Департамент патрульної поліції; підрозділи Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України; виконавчі органи місцевих рад. Прогнози передаються споживачам тільки у випадку, коли очікується ВРЗП. У цьому випадку складається **попередження.**

Розроблена система попереджень трьох ступенів небезпеки. Кінцева мета заходів у період дії попереджень – зниження концентрації домішок до рівня ГДК. Але в деяких містах існує перевищення ГДК часто і при відсутності НМУ, тому нереально добиватися досягнення рівня ГДК у небезпечні періоди. Тому попередження складаються на основі очікуваних НМУ з урахуванням відповідного РЗП, різного в різних містах. Для випадку окремого джерела таким рівнем є розрахована максимальна концентрація домішки S_m .

Умови, при яких складаються попередження.

У випадку окремих джерел попередження I ступеню небезпеки складаються, коли прогнозується один з комплексів НМУ і за цим у даному місті S_m хоч би однієї з домішок перевищує ГДК.

Попередження II ступеню небезпеки складаються, якщо прогноуються два таких комплексу (якщо при небезпечній швидкості

вітру очікується піднесена інверсія та несприятливий напрямок вітру), за цим у даному місті $S_m > 3ГДК$.

Попередження III ступеню небезпеки складаються у випадку, коли після передачі попередження другого ступеню небезпеки вступна інформація показує, що при метеоумовах, які зберігаються, прийняті засоби не забезпечують необхідну чистоту атмосфери. За цим у даному місті $S_m > 5ГДК$.

Якщо підприємство, яке обслуговується знаходиться у місті де відсутнє регулярне вимірювання концентрації домішок у повітрі, тоді попередження III ступеню не складаються.

У випадку прогнозів по місту у цілому підставою для складання попереджень про відносно високий РЗП є очікуване значення узагальненого показника.

За цим попередження I ступеню складається, якщо очікуються значення узагальненого показника, який входить до 10%-вої групи найбільших значень. Принцип урахування ГДК зберігається такий, як і для окремих джерел.

Для Р розрахованого за сукупністю домішок, частіше всього в 2%-ву групу найбільших значень входять $P > 0,5$; у 10%-ву - $P > 0,35$.

За цим умови складання попереджень:

- попередження I ступеню небезпеки, якщо очікується $0,5 \geq P > 0,35$. За цим $S_m > ГДК$;
- попередження II ступеню небезпеки, якщо очікується $P > 0,5$. За цим у місті $S_m > 3ГДК$;
- попередження III ступеню небезпеки, якщо після передачі попередження II ступеню залишається ВРЗА і очікується зберігання НМУ. За цими у місті $S_m > 5ГДК$.

Отже, якщо у місті $S_m \geq 3ГДК$, тоді можна складати попередження тільки першого ступеню небезпеки, якщо $3ГДК < S_m \leq 5ГДК$ – попередження двох ступенів небезпеки, якщо $S_m > 5ГДК$ – попередження трьох ступенів небезпеки.

У містах, де ГДК практично не досягається (повторюваність концентрацій, які перевищують ГДК, менше 2%), попередження про НМУ не складається.

Основою для складання попередження є очікувані НМУ, за якими можуть утворюватися ВРЗП. Встановлюється задача: з урахуванням

завчасного прогнозу досягти запобігання росту концентрацій домішок у повітрі.

Цей підхід відрізняється від закордонного, де при складанні попереджень (тривог), враховуються критичні рівні концентрацій домішок у повітрі. У нас основою для складання оповіщення є знаходження високих концентрацій, якщо ці концентрації раніше не прогнозувались. Це може бути або внаслідок невірної метеорологічного прогнозу, або внаслідок, того, що значне збільшення концентрації здійснилось за рахунок великого збільшення викидів при відсутності НМУ. Оповіщення складаються трьох ступенів небезпеки відповідно з висловленими принципами.

Питання для самоконтролю:

1. Які загальні принципи розробки прогнозу забруднення атмосфери?
2. Які результати випробувань прогностичних схем?
3. О чому свідчить досвід оперативного прогнозування забруднення повітря?
4. Які питання треба розглянути при організуванні робіт по прогнозуванню забруднення повітря?
5. Скільки і які існують категорії попереджень очікуваного підвищеного рівня забруднення атмосфери?
6. Для чого застосовується критерій М.А.Багрова?
7. Які прогностичні схеми забруднення атмосфери вважаються ефективними?
8. Як перевіряють ефективність прогнозів, де прогнозують клас/групу забруднення атмосфери?

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. 203 с.
2. КД 52.9.4.01-09 Охорона природи. Атмосфера. Методичні вказівки щодо прогнозування метеорологічних умов формування рівнів забруднення повітря в містах України. Київ: Державна гідрометеорологічна служба. 2010. 321 с. URL: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=77204 (дата звернення 28.04.2021).
3. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере. Справочное пособие /под ред. Безуглой Э.Ю., Берлянда М.Е. Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. 287 с.
4. Методические указания по прогнозированию загрязнения воздуха в городах /под ред. М.Е. Берлянда. Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. 70 с.
5. Моделювання і прогнозування стану довкілля: підручник / В.І. Лаврік, В.М. Боголюбов, Полетаєва Л.М. та ін. Київ: ВЦ «Академія», 2010. 400 с.
6. Полетаєва Л.М., Юрасов С.М., Ільїна В.Г. Моделювання та прогнозування стану довкілля. Дніпропетровськ: Економіка, 2005. 179 с.
7. Семенченко Б.А., Белов П.Н. Метеорологические аспекты охраны природной среды. Москва: Изд-во МГУ, 1985. 38 с.
8. Сонькин Л.Р. Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 223 с.

Додаткова література

9. Збірник методичних вказівок до практичних робіт з дисципліни "Моделювання та прогнозування стану довкілля" для студентів III курсу денної форми навчання за спеціальністю "Екологія та охорона навколишнього середовища". / Полетаєва Л.М., Юрасов С.М., Ільїна В.Г. та ін. Одеса: ОДЕКУ, 2006. 52 с.
10. Зверев А.С. Синоптическая метеорология Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. 712 с.

11. Реймерс Н.Ф. Природопользование. Словарь-справочник. Москва: Мысль, 1990. 639 с.

12. Boettger C.M., Smith H.J. The Nashvill daily air pollution forecast // Mon. Wea. Rev. 1961. V.89, N 11. P. 477 - 481.

Навчальне електронне видання

ПОЛЕТАЄВА Лариса Миколаївна

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ
(атмосферне повітря)**

Конспект лекцій

Видавець і виготовлювач

Одеський державний екологічний університет

вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016

тел./факс: (0482) 32-67-35

Е-mail: info@odeku.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 5242 від 08.11.2016