

© Ю.В. Бучавий<sup>1</sup>, П.К. Ломазов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ НЕСПРИЯТЛИВИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ ДЛЯ РОЗСІЮВАННЯ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ

© Yu. Buchavyi<sup>1</sup>, P. Lomazov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR FORECASTING UNFAVORABLE METEOROLOGICAL CONDITIONS FOR THE DISPERSION OF POLLUTANTS IN THE AIR

**Мета.** Удосконалити методику прогнозування несприятливих метеорологічних умов для розсіювання забруднювальних речовин на основі розрахунку параметрів стратифікації атмосфери за синоптичними прогнозами.

**Методика досліджень.** Дослідження базується на методах математичного моделювання процесів атмосферної дифузії, аналізу емпіричних даних та результатів метеорологічних спостережень. Використано методики визначення класу стійкості приземного атмосферного шару, обчислення коефіцієнта вертикального турбулентного обміну домішок у ньому, а також оцінки впливу погодних умов на розповсюдження забруднюючих речовин. Додатково застосовані статистичні методи обробки даних для покращення точності моделей атмосферної дифузії.

**Результати досліджень.** Запропоновано удосконалений алгоритм обчислення вертикальної турбулентної дифузії забруднювачів в атмосфері за метеорологічними даними. Алгоритм враховує параметри вітру, температурні градієнти, атмосферну стратифікацію та хмарність. Розроблений підхід дозволяє підвищити точність прогнозів концентрацій забруднюючих речовин у міському середовищі, а також прогнозувати несприятливі для розсіювання погодні умови.

**Наукова новизна.** Виявлено залежність між швидкістю вітру, хмарністю, висотою Сонця над обрієм та коефіцієнтом вертикальної дифузії, що дозволяє прогнозувати несприятливі метеорологічні умови для розсіювання забруднювальних речовин в атмосферному повітрі. Обґрунтовано вдосконалений алгоритм розрахунку вертикальної турбулентної дифузії забруднювальних речовин в атмосфері, що враховує метеорологічні параметри та дозволяє підвищити точність моделювання процесів розповсюдження домішок у приземному шарі повітря.

**Практичне значення.** Прогнозування несприятливих метеорологічних умов на період до 3–7 днів дозволить промисловим підприємствам заздалегідь корегувати інтенсивність викидів забруднювальних речовин, що сприятиме зниженню їх впливу на здоров'я населення. Запропонований підхід може бути використаний у системах моніторингу довкілля, при розробці стратегій зменшення забруднення, а також у наукових дослідженнях з моделювання атмосферних процесів. Врахування метеорологічних факторів у прогнозуванні забруднення повітря сприятиме більш ефективному плануванню заходів щодо зниження рівня шкідливих викидів та захисту громадського здоров'я.

**Ключові слова:** моделі атмосферної дифузії, джерела забруднення атмосфери, промислові викиди, стратифікація атмосфери.

**Вступ.** Одним із пріоритетних завдань моніторингу атмосферного повітря промислових міст, поряд із безпосередніми вимірюваннями приземних концентрацій забруднювальних речовин на постах спостереження, є моделювання процесів перенесення та осідання шкідливих домішок від організованих джерел забруднення. Для цього розроблено значну кількість математичних моделей і програмних продуктів, які дозволяють оцінювати рівень забруднення атмосфери. Сьогодні у природоохоронній діяльності широко застосовуються методики та програмні комплекси, засновані на моделях атмосферної дисперсії, зокрема на розподілі Гауса (*ISC3*, *AERMOD*, *IEM*), підходах Ейлера, Лагранжа (*CALPUFF*) та Нав'є-Стокса до розв'язання рівнянь турбулентної дифузії, а також емпіричних залежностей (*ОНД-86*, *РД-52*, *HPDM*), методик МАГАТЕ тощо [1–4]. Вибір конкретної моделі чи програмного продукту залежить від цілей дослідження, вимог до точності розрахунків та наявності вхідних даних.

Для підвищення точності розрахунків параметрів забруднення атмосфери сьогодні необхідно використовувати математичні моделі та програмні комплекси, що враховують метеорологічні умови та інші важливі параметри як от зміна швидкості та напрямку вітру, взаємодія домішок із підстильною поверхнею, фізико-хімічні перетворення забруднювачів тощо. Важливу роль у точності моделювання відіграє також врахування стратифікації атмосфери, яка визначає інтенсивність вертикального турбулентного обміну домішок і, відповідно, впливає на їхню концентрацію в приземному шарі повітря.

У зв'язку з цим для регулювання викидів підприємств з урахуванням метеорологічних умов розроблено керівний документ КД 52.9.4.01–09 [5], який визначає методи і порядок складання метеорологічних умов для прогнозування забруднення приземного шару атмосферного повітря в населених пунктах. Варто відмітити, що залежність забруднення атмосфери від метеорологічних умов неоднозначна, а має визначатися за особливостями спільного впливу складових чинників: техногенні параметри джерел викидів, топографічні особливості території, і та власно метеорологічні величини. У формуванні поля забруднення від окремих джерел погодні умови, як і емісійні параметри, є визначальними, при цьому до числа основних метеорологічних величин, від яких залежить інтенсивність розповсюдження домішок, належать: режим вітру й температурна стратифікація атмосфери. Швидкість вітру, стійко-стратифікована атмосфера й тумани зазвичай створюють несприятливі умови для розсіювання домішок і сприяють їхньому накопичуванню і зростанню приземних концентрацій на прилеглий до джерел забруднення території.

Врахування погодних умов є важливим, оскільки при незмінній інтенсивності викидів від організованого джерела характер розподілу приземних концентрацій на прилеглий території може суттєво відрізнятися: при інверсіях та малій швидкості вітру приземні концентрації забруднювальних речовин будуть значно більшими ніж за умов інверсії або сильному вітру, що сприяє інтенсивному перемішуванню забруднювальних речовин. Узагальнена характеристика викидів та відповідних несприятливих метеорологічних умов наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Несприятливі метеорологічні умови для основних груп джерел викидів [5]

| Характеристика викидів | Термічна стратифікація нижнього шару атмосфери | Швидкість вітру на рівні, м/с |         | Вид інверсії, її висота над джерелом, м |
|------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------------------|
|                        |                                                | Флюгера                       | Викидів |                                         |
| Гарячі високі          | Нестійка                                       | 3 – 7 штиль                   | 5 – 10  | Підвищена 100 – 300                     |
| Холодні високі         | Нестійка                                       | 1 – 2 штиль                   | 2 – 4   | Підвищена 100 – 300                     |
| Низькі                 | Стійка                                         | штиль                         | штиль   | приземна                                |

Положення та вимоги КД 52.9.4.01–09 поширюються на організації, підприємства, установи державної гідрометеорологічної служби, які здійснюють гідрометеорологічне забезпечення та на спеціально уповноважені органи з питань регулювання викидів, розроблення та виконання природоохоронних заходів щодо захисту атмосфери у випадках несприятливих метеорологічних умов. Даний документ має достатньо добре математичне підґрунтя щодо процедури прогнозування метеорологічних умов забруднення атмосфери, натомість не надає роз'яснень щодо вихідних даних, необхідних для її реалізації. Окрім того, сьогодні промислові підприємства фактично не мають певних інструкцій чи зобов'язань щодо врахування несприятливих метеорологічних умов для корегування інтенсивності викидів від організованих джерел, а лише слідкують та звітують щодо дотримування встановлених лімітів на викиди. Тому окремою задачею є удосконалення методики прогнозування метеорологічних умов, що впливають на розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері, насамперед визначення несприятливих для розсіювання метеорологічних умов (НМУ) для певної території. Врахування таких факторів, як швидкість і напрямок вітру, температура, вологість, атмосферна турбулентність і стратифікація, є необхідними як для прогнозування НМУ так і для точного моделювання розсіювання забруднювальних речовин.

Прогнозування несприятливих для розсіювання забруднювальних речовин метеорологічних умов дозволять передбачити та знизити небезпеку для здоров'я населення від викидів промислових підприємств, шляхом нормування їх інтенсивності. В свою чергу для прогнозування НМУ потрібні перспективні дані про швидкість, напрямок вітру, хмарність, та стратифікацію атмосфери на певний період часу.

**Основні результати.** Існують різні підходи до врахування метеорологічних умов при моделюванні процесів забруднення атмосферного повітря від організованих джерел. В роботі [6] проведено комплексне дослідження впливу метеорологічних факторів та антропогенного навантаження на повітряний басейн м. Одеса з використанням вперше розвинутих нових математичних моделей та новітніх комп'ютерних технологій, будуються нові ефективні, високо достовірні

моделі короткострокового прогнозу концентрацій забруднюючих речовин в атмосфері на основі положень теорії хаосу з використанням ієрархії нелінійно-системних моделей. Завдяки такому підходу можна підвищити точність оцінки екологічної ситуації та покращити прогнозування динаміки забруднення, що особливо актуально для промислових регіонів із високим рівнем техногенного навантаження. Щодо врахування метеорологічних параметрів автори застосовують ймовірнісний підхід на основі великого масиву даних про напрямок та швидкість вітру.

В іншому дослідженні [7] розглянуто ефективність прогнозування метеорологічних умов забруднення на прикладі м. Києва у вересні-грудні 2015 року – періоді, що характеризувався тривалим забрудненням атмосфери внаслідок горіння торф'яників.

У межах цього підходу було оцінено три ключові предиктори, що входять до прогностичної моделі:

- Тип синоптичної ситуації – загальний атмосферний режим, що визначає характер циркуляції повітряних мас.

- Товщина шару перемішування – вертикальний діапазон атмосфери, в якому відбувається активне перемішування забруднюючих речовин.

- Середня швидкість вітру в шарі перемішування – визначає ефективність горизонтального і вертикального розсіювання забруднювальних речовин.

Аналіз показав, що точність прогнозування метеорологічних умов забруднення за цією методикою склала 77%, що вказує на її високу ефективність. Такий підхід є перспективним для використання в системах екологічного моніторингу, оскільки дозволяє прогнозувати можливі періоди підвищеної концентрації забруднюючих речовин і своєчасно реагувати на погіршення якості повітря.

Ці результати підтверджують доцільність застосування подібних моделей для оцінки та прогнозування забруднення атмосфери в умовах різних регіональних особливостей та антропогенних впливів.

Аналіз методів прогнозування забруднення повітря свідчить про їхню важливу роль у регулюванні викидів та покращенні екологічної ситуації в містах. Дослідження показують, що у випадках стабільного виробництва та регулярного контролю забруднення попереджувальні заходи є ефективними, оскільки підприємства, отримуючи прогнози про несприятливі метеорологічні умови, можуть знижувати обсяги викидів. Крім того, використання узагальнених показників якості повітря (наприклад, параметрів Q або P) дозволяє оцінювати загальні тенденції забруднення, що сприяє розробці більш точних і дієвих екологічних стратегій [8].

В останні кілька десяти років за рахунок бурхливого розвитку інформаційних систем та комп'ютерних технологій відбулися значні зміни в прогнозуванні погоди, що дозволяють суттєво підвищити точність прогнозування метеорологічних умов для певної території на період до 3–7 днів. Багато популярних синоптичних сервісів ([metoffice.gov.uk](http://metoffice.gov.uk), [windguru.cz](http://windguru.cz), [gismeteo.ua](http://gismeteo.ua), [windy.com](http://windy.com), [meteo.gov.ua](http://meteo.gov.ua) та ін.) мають як ретроспективні дані у вигляді архівів так і прогнозні які постійно викладають у вільний доступ. Це дозволяє також спрогнозувати і несприятливі метеорологічні умови для розсіювання викидів на основі даних про швидкість та

напрямок вітру, температуру, тиск, хмарність, тип та інтенсивність опадів тощо. Нажаль жоден сервіс не надає інформацію про такий важливий для моделювання атмосферної дифузії параметр як стратифікація атмосфери на певний період часу, який в свою чергу є необхідним для визначення коефіцієнтів дифузії забруднювальних речовин. У зв'язку з чим виникає необхідність у визначенні цих коефіцієнтів розрахунковим способом.

Згідно з результатами експериментальних спостережень [9], значення коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії на рівні земної поверхні змінюється в діапазоні від 0,005 м<sup>2</sup>/с до 0,3 м<sup>2</sup>/с залежно від стану атмосфери: мінімальні значення характерні для надзвичайно стійких умов, тоді як максимальні спостерігаються за сильно нестійкого стану атмосфери. Окрім стратифікації атмосфери, на цей показник суттєво впливають додаткові фактори, зокрема рельєф місцевості, який визначає особливості повітряного потоку, а також швидкість і напрямок вітру.

Зі збільшенням висоти значення коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії також змінюється, що є важливим аспектом при моделюванні розповсюдження забруднювальних речовин у атмосферному повітрі. Врахування цих чинників дозволяє підвищити точність прогнозів щодо поширення домішок і сприяє розробці більш ефективних методів контролю якості повітря (табл. 2).

Таблиця 2

Класи стійкості атмосфери та значення вертикальної дифузії [10]

| Клас стійкості | Характеристика   | Явище     | Вертикальна дифузія, м <sup>2</sup> /с |
|----------------|------------------|-----------|----------------------------------------|
| I (A)          | Сильно нестійка  | Конверсія | 0,20                                   |
| II (B)         | Помірно нестійка | Конверсія | 0,12                                   |
| III (C)        | Слабко нестійка  | Конверсія | 0,08                                   |
| IV (D)         | Байдужа          | Ізотермія | 0,06                                   |
| V (E)          | Слабко стійка    | Інверсія  | 0,03                                   |
| VI (F)         | Стійка           | Інверсія  | 0,02                                   |

Через значні зміни вертикальної дифузії в крайніх станах атмосфери цей параметр суттєво впливає на результати моделювання. Він відіграє особливо важливу роль, наприклад, при використанні нестационарної моделі переносу забруднень для прогнозування зараження території внаслідок аварійних викидів токсичних речовин. Також він необхідний для оцінки ризиків для здоров'я населення за значеннями середніх концентрацій забруднювальних речовин за тривалий період. Визначення класу стійкості атмосфери та коефіцієнта вертикальної дифузії є складним завданням.

Сьогодні на практиці для оцінки стійкості атмосфери застосовуються такі методи:

- аналіз швидких флуктуацій напрямку вітру;
- оцінка за висотним градієнтом температури або швидкості вітру.

Такі спостереження проводяться на спеціальних теплобалансових станціях, де, окрім стандартних метеорологічних параметрів, визначають зміни температури й тиску з висотою за допомогою аеростатів або 300-метрових щогл. Однак наразі Україні такі систематичні спостереження не проводяться, що ускладнює збирання статистичних даних про стан стратифікації атмосфери для конкретних територій.

В роботі [10] описано методику класифікації атмосферної турбулентності, зокрема класи стійкості приземного шару атмосфери, які пізніше отримали назву шкали Пасквілла.

Пасквілл запропонував емпіричну класифікацію атмосферної стійкості, яка базується на характеристиках турбулентного обміну та метеорологічних параметрах (швидкості вітру, радіаційному балансу та хмарності).

Теоретична оцінка категорії стійкості атмосфери може проводитися за методами Пасквіла, Тернера та Моніна-Обухова. Метод Моніна-Обухова потребує додаткових даних про середню висоту нерівностей поверхні та швидкість тертя повітря об неї. Метод Тернера враховує наявність снігового покриву, а також характеристики поглинання й відбиття світла різними поверхнями. Найбільш оперативним є метод Пасквіла, який визначає клас стійкості атмосфери на основі швидкості вітру, загальної та нижньої хмарності, а також висоти Сонця над горизонтом удень. Залежність класу стійкості атмосфери від цих параметрів наведена в таблиці 3.

Таблиця 3

Класи стійкості приземного шару атмосфери за методикою Пасквілла [11]

| Швидкість<br>вітру, м/с | День  |          |        | День, ніч<br>n=8–10 | Ніч   |       |
|-------------------------|-------|----------|--------|---------------------|-------|-------|
|                         | h>60° | h=15–60° | h<15 ° |                     | O=5–8 | O≤4   |
| <2                      | 1     | 1–2      | 2–3    | 4                   | 5 – 6 | 6 – 7 |
| 2 – 3                   | 1 – 2 | 2        | 3      | 4                   | 5     | 6     |
| 3 – 4                   | 2     | 2 – 3    | 3      | 4                   | 4     | 5     |
| 5 – 6                   | 3     | 3 – 4    | 4      | 4                   | 4     | 4     |
| >6                      | 3     | 4        | 4      | 4                   | 4     | 4     |

Варто зазначити, що дана класифікація станів приземного шару атмосфери неодноразово перевірялася та уточнювалася для різних територій і кліматичних умов [11]. Проте, на сьогоднішній день не розроблено уніфікованої методики, яка б дозволяла точно визначати ці значення в конкретний момент часу.

Удосконалений підхід представлений у вигляді алгоритму, який зображено на рисунку 1. Така методика дозволяє більш точно визначати стійкість атмосфери в залежності від змінних умов, що особливо важливо для екологічного моніторингу, моделювання поширення забруднень та прогнозування атмосферних процесів.

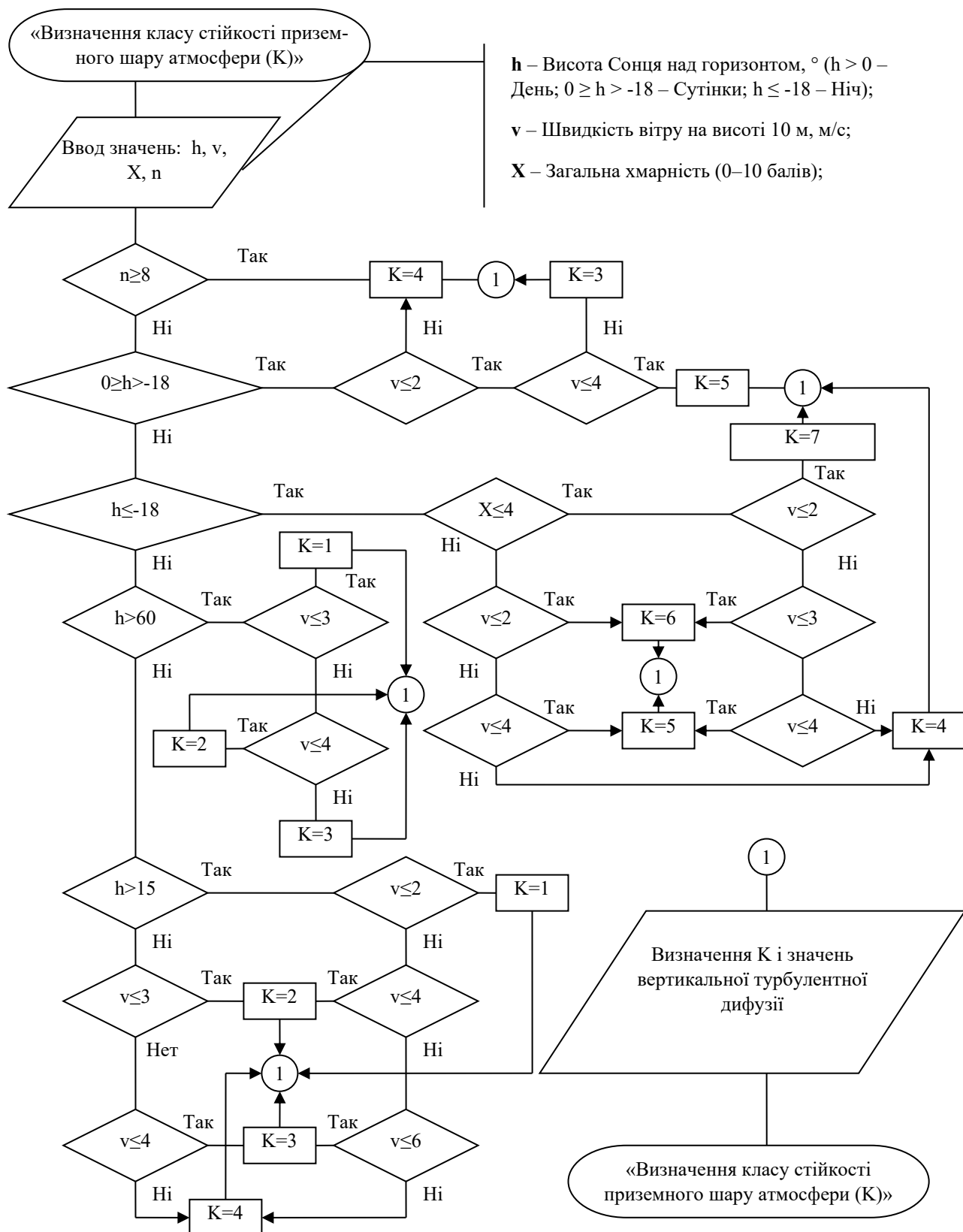


Рис. 1. Алгоритм обчислення вертикальної турбулентної дифузії забруднювачів в атмосфері за метеорологічними даними

Існує кілька способів визначення висоти Сонця, які відрізняються рівнем точності залежно від вихідних даних. Для швидкого й достатньо точного розрахунку

висоти Сонця за географічними координатами, датою та часом рекомендується застосовувати наступну експрес-методику, розроблену на основі [12].

Висота Сонця над горизонтом  $h^\circ$  визначається за формулою:

$$h = 90 - \arccos(\sin(Lat) \cdot \sin(Dec) + \cos(Lat) \cdot \cos(Dec) \cdot \cos(ST - Ra)), \quad (1)$$

де  $Lat$  – геодезична широта, у десяткових градусах;  $Ra$ ,  $Dec$  – екваторіальні геоцентричні координати Сонця:

$$Ra = \arctg\left(\frac{0.917482 \cdot \sin(L)}{\cos(L)}\right) \quad (2)$$

$$Dec = \arctg\left(\frac{0.397777 \cdot \sin(L)}{\sqrt{(\cos(L))^2 + 0.917482 \cdot \sin(L)^2}}\right); \quad (3)$$

де  $L$ , довгота сонця, що обчислюється за формулою:

$$L = L0 + (1,915 - 0,0048 \cdot T0) \cdot \sin(M) + 0.02 \cdot \sin(2 \cdot M) \quad (4)$$

$T$  – Модифікована дата початку доби (у Юліанських століттях)

$$T = \frac{MD - 51544,5}{36525} \quad (5)$$

$$L0 = 280.46 + 3600,772 \cdot T0 + 0.04107 \cdot UT; \quad (6)$$

$M$  – Середня аномалія:

$$M = 357.528 + 35999.05 \cdot T0 + 0.04107 \cdot UT \quad (7)$$

де  $UT$  – час за Гринвічем, округлений до години після опівночі;  $ST$  – місцевий зоряний час, що обчислюється за формулою:

$$ST = \frac{(24110.54841 + 864018.812 \cdot \left(\frac{MD - 51544.5}{36635}\right)^2 - 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{MD - 51544.5}{36635}\right)^3 + 3605.8564 \cdot UT)}{54000} + Lon \quad (8)$$

$MD$  – дата за Юліанським календарем на початок доби, що визначається за формулою:

$$MD = V1 + V2 + \frac{306001 \cdot (Mn + 1)}{1000 + D} \quad (9)$$

Тут  $V3 = 365 \cdot Y - 679004$ ,  $V1 = 10000 \cdot Y + 100 \cdot Mn + D$ ;

Якщо  $Mn \leq 2$ , то  $Mn = Mn + 12$ , а  $Y = Y - 1$

Де  $Y$  – год;  $Mn$  – місяць;  $D$  – день.

Для значень  $V1 \leq 15821004$  змінна  $V2$  визначається за формулою (10):

$$V2 = \frac{(Y + 4716)}{4} - 1181. \quad (10)$$

Для значень  $V1 > 15821004$  змінна  $V2$  визначається за формулою (11):

$$V2 = \frac{Y}{400} - \frac{Y}{100} + \frac{Y}{4}. \quad (11)$$

У формулах для знаходження значення *MDMDMD* та його складових (9–11) використовується цілочисельне ділення. Це означає, що при розрахунках дробові частини чисел відкидаються, що може впливати на точність підсумкових значень.

Для апробації даного підходу за допомогою наведеного алгоритму була визначена ймовірність стану стійкості атмосфери для Дніпра на основі прогнозних метеорологічних даних на період з 19–23 березня 2025 рік.

Серед джерел отримання метеорологічних даних для прогнозування НМУ за запропонованим алгоритмом варто надавати перевагу метеостанціям, розташованих в аеропортах [13, 14], оскільки вони містять дані про нижню та загальну хмарність, здійснюють заміри кожні 3, 4 або 6 годин, та накопичують архівні дані за тривалий період спостережень. Фрагмент такої бази погодних умов з метеостанції аеропорту «Кодаки» для міста Дніпро наведено на рис. 2.

|    | A                                                                             | B    | C     | D     | E    | F  | G             | H  | K           | Q                    | R  | S         | T                   | U  | V    | W    |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|------|-------|-------|------|----|---------------|----|-------------|----------------------|----|-----------|---------------------|----|------|------|
| 1  | # Метеостанція Дніпро (аеропорт), Україна, WMO_ID=34504, вибірка з 17.03.2025 |      |       |       |      |    |               |    |             |                      |    |           |                     |    |      |      |
| 7  | Місцевий час в Дніг                                                           | T    | Po    | P     | Pa   | U  | DD            | Ff | N           | Cl                   | Nh | H         | Cm                  | Ch | VV   | Td   |
| 8  | 23.03.2025 23:00                                                              | 7.6  | 759.2 | 772.3 | 0.1  | 53 | Вітер, що дмк | 2  | 60%.        | Шарувато-к 60%.      |    | 2500 або  | Високо-ку Перистих, |    | 35.0 | -1.4 |
| 9  | 23.03.2025 20:00                                                              | 9.3  | 759.1 | 772.2 | 0.3  | 46 | Вітер, що дмк | 2  | 100%.       | Шарувато-к 100%.     |    | 2500 або  | Високо-купчасті про |    | 35.0 | -1.7 |
| 10 | 23.03.2025 17:00                                                              | 10.4 | 758.8 | 771.9 | -0.7 | 43 | Вітер, що дмк | 4  | 100%.       | Шарувато-к 50%.      |    | 1000-1500 | Високо-купчасті про |    | 60.0 | -1.8 |
| 11 | 23.03.2025 14:00                                                              | 9.9  | 759.5 | 772.6 | 0.0  | 49 | Вітер, що дмк | 5  | 100%.       | Шарувато-к 70 – 80%. |    | 1000-1500 | Високо-купчасті про |    | 60.0 | -0.5 |
| 12 | 23.03.2025 11:00                                                              | 10.4 | 759.5 | 772.6 | 0.4  | 43 | Вітер, що дмк | 4  | 70 – 80%.   | Шарувато-к 60%.      |    | 1000-1500 | Високо-ку Перистих, |    | 45.0 | -1.8 |
| 13 | 23.03.2025 08:00                                                              | 6.9  | 759.1 | 772.3 | 1.0  | 48 | Вітер, що дмк | 3  | хмар немає  |                      |    |           |                     |    | 40.0 | -3.6 |
| 14 | 23.03.2025 05:00                                                              | 3.7  | 758.1 | 771.4 | 0.6  | 64 | Вітер, що дмк | 2  | 20–30%.     | Шарувато-к 20–30%.   |    | 2500 або  | Високо-ку Перистих, |    | 40.0 | -2.6 |
| 15 | 23.03.2025 02:00                                                              | 5.6  | 757.5 | 770.7 | 0.2  | 55 | Вітер, що дмк | 3  | 40%.        | Шарувато-к 40%.      |    | 2500 або  | Високо-ку Перистих, |    | 45.0 | -2.9 |
| 16 | 22.03.2025 23:00                                                              | 7.1  | 757.3 | 770.5 | 0.8  | 55 | Вітер, що дмк | 3  | 90 або біль | Шарувато-к 90 або бі |    | 1000-1500 | Високо-ку Перистих, |    | 45.0 | -1.4 |
| 17 | 22.03.2025 20:00                                                              | 9.9  | 756.5 | 769.5 | 1.0  | 37 | Вітер, що дмк | 3  | 70 – 80%.   | Шарувато-к 70 – 80%. |    | 1000-1500 | Високо-ку Перистих, |    | 40.0 | -4.2 |
| 18 | 22.03.2025 17:00                                                              | 12.7 | 755.5 | 768.4 | 0.0  | 29 | Вітер, що дмк | 2  | 70 – 80%.   | Шарувато-к 70 – 80%. |    | 1000-1500 | Високо-ку Перистих, |    | 55.0 | -4.9 |
| 19 | 22.03.2025 14:00                                                              | 13.6 | 755.5 | 768.3 | -0.3 | 29 | Вітер, що дмк | 3  | 60%.        | Шарувато-к 40%.      |    | 1000-1500 | Високо-ку Перистих, |    | 50.0 | -4.0 |
| 20 | 22.03.2025 11:00                                                              | 11.0 | 755.8 | 768.7 | 0.3  | 41 | Вітер, що дмк | 3  | 60%.        | Шарувато-к 60%.      |    | 2500 або  | Високо-ку Перистих, |    | 50.0 | -1.9 |
| 21 | 22.03.2025 08:00                                                              | 3.6  | 755.5 | 768.8 | 0.6  | 61 | Вітер, що дмк | 3  | 70 – 80%.   | Шарувато-к 70 – 80%. |    | 2500 або  | Високо-ку Перистих, |    | 45.0 | -3.4 |
| 22 | 22.03.2025 05:00                                                              | 2.3  | 754.9 | 768.3 | -0.4 | 58 | Вітер, що дмк | 2  | 20–30%.     | Шарувато-к 20–30%.   |    | 2500 або  | Високо-ку Перистих, |    | 60.0 | -5.2 |
| 23 | 22.03.2025 02:00                                                              | 4.3  | 755.3 | 768.6 | -0.6 | 48 | Вітер, що дмк | 2  | хмар немає  |                      |    |           |                     |    | 60.0 | -5.9 |

Рис. 2. Вихідні дані для визначення класу стратифікації атмосфери та прогнозування НМУ

Далі цей фрагмент було оброблено згідно наведеного вище алгоритму та методикою розрахунку висоти Сонця для визначення часу доби на відповідний період спостережень. Нижню та загальну хмарність переведено з відсотків до 10 бальної шкали.

Результати визначення стану стратифікації атмосфери на основі прогнозу метеоданих наведено в табл. 4.

Розподіл класів стійкості атмосфери м. Дніпро за період з 19–23 березня 2025 наведено на рис. 3.

Впродовж періоду з 19 до 23 березня 2025, що має 41 запис про метеорологічні умови, нараховано 8 випадків інверсій (<20%), що ототожнюється з несприятливими метеорологічними умовами для розсіювання забруднювальних речовин від низьких організованих джерел, викидів автотранспорту тощо.

Аналіз отриманих даних дозволив оцінити частоту виникнення різних класів стійкості атмосфери протягом року та їхню залежність від метеорологічних факторів, таких як швидкість вітру, хмарність та висота Сонця.

Таблиця 4

Визначення класу стратифікації атмосфери на основі прогнозу метеоданих

| Дата час                | Швидкість вітру $u$ , м/с | Загальна хмарність, по(1–10) | Температура повітря $t$ , °C | Висота сонця над горизонтом $h$ , ° | Час доби       | Стратифікація (клас 1–6) |
|-------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|----------------|--------------------------|
| <b>19.03.2025 2:00</b>  | <b>4</b>                  | <b>0</b>                     | <b>-2.7</b>                  | <b>-21.63</b>                       | <b>Ніч</b>     | <b>5</b>                 |
| 19.03.2025 5:00         | 5                         | 0                            | -3.4                         | 7.72                                | День           | 4                        |
| 19.03.2025 8:00         | 4                         | 7                            | -1                           | 33.79                               | День           | 2                        |
| 19.03.2025 11:00        | 3                         | 7                            | 2.9                          | 21.06                               | День           | 2                        |
| 19.03.2025 14:00        | 4                         | 9                            | 4                            | -8.33                               | Сутінки        | 4                        |
| 19.03.2025 17:00        | 3                         | 9                            | 4.2                          | -34.6                               | Ніч            | 4                        |
| 19.03.2025 20:00        | 4                         | 9                            | 2.8                          | -41.09                              | Ніч            | 4                        |
| <b>19.03.2025 23:00</b> | <b>3</b>                  | <b>7</b>                     | <b>2.7</b>                   | <b>-21.63</b>                       | <b>Ніч</b>     | <b>5</b>                 |
| 20.03.2025 2:00         | 3                         | 10                           | 1.5                          | 7.97                                | День           | 4                        |
| 20.03.2025 5:00         | 7                         | 10                           | 2.1                          | 34.12                               | День           | 4                        |
| 20.03.2025 8:00         | 6                         | 9                            | 3.2                          | 40.91                               | День           | 4                        |
| 20.03.2025 11:00        | 6                         | 8                            | 9.4                          | 21.42                               | День           | 4                        |
| 20.03.2025 14:00        | 5                         | 8                            | 10.8                         | -7.99                               | Сутінки        | 4                        |
| 20.03.2025 17:00        | 5                         | 9                            | 10.6                         | -34.22                              | Ніч            | 4                        |
| 20.03.2025 20:00        | 5                         | 9                            | 8.2                          | -40.72                              | Ніч            | 4                        |
| 20.03.2025 23:00        | 5                         | 7                            | 7.5                          | -21.36                              | Ніч            | 4                        |
| 21.03.2025 2:00         | 5                         | 6                            | 4.9                          | 8.21                                | День           | 4                        |
| 21.03.2025 5:00         | 8                         | 6                            | 4.1                          | 34.44                               | День           | 4                        |
| 21.03.2025 8:00         | 7                         | 0                            | 6.5                          | 41.31                               | День           | 4                        |
| 21.03.2025 11:00        | 4                         | 7                            | 12.6                         | 21.78                               | День           | 2                        |
| 21.03.2025 14:00        | 4                         | 4                            | 12.9                         | -7.64                               | Сутінки        | 4                        |
| <b>21.03.2025 17:00</b> | <b>4</b>                  | <b>3</b>                     | <b>12.7</b>                  | <b>-33.83</b>                       | <b>Ніч</b>     | <b>5</b>                 |
| <b>21.03.2025 20:00</b> | <b>4</b>                  | <b>4</b>                     | <b>10.3</b>                  | <b>-40.34</b>                       | <b>Ніч</b>     | <b>5</b>                 |
| 21.03.2025 23:00        | 5                         | 0                            | 5.5                          | -21.08                              | Ніч            | 4                        |
| 22.03.2025 2:00         | 3                         | 0                            | 4.3                          | 8.46                                | День           | 3                        |
| 22.03.2025 5:00         | 7                         | 3                            | 2.3                          | 34.76                               | День           | 4                        |
| 22.03.2025 8:00         | 5                         | 7                            | 3.6                          | 41.72                               | День           | 3                        |
| 22.03.2025 11:00        | 2                         | 6                            | 11                           | 22.14                               | День           | 1                        |
| 22.03.2025 14:00        | 2                         | 6                            | 13.6                         | -7.3                                | Сутінки        | 3                        |
| <b>22.03.2025 17:00</b> | <b>1</b>                  | <b>7</b>                     | <b>12.7</b>                  | <b>-33.44</b>                       | <b>Ніч</b>     | <b>6</b>                 |
| <b>22.03.2025 20:00</b> | <b>2</b>                  | <b>7</b>                     | <b>9.9</b>                   | <b>-39.97</b>                       | <b>Ніч</b>     | <b>5</b>                 |
| 22.03.2025 23:00        | 2                         | 9                            | 7.1                          | 41.72                               | День           | 4                        |
| <b>23.03.2025 2:00</b>  | <b>2</b>                  | <b>4</b>                     | <b>5.6</b>                   | <b>-6.95</b>                        | <b>Сутінки</b> | <b>5</b>                 |
| <b>23.03.2025 5:00</b>  | <b>3</b>                  | <b>3</b>                     | <b>3.7</b>                   | <b>-20.54</b>                       | <b>Ніч</b>     | <b>5</b>                 |
| 23.03.2025 8:00         | 3                         | 0                            | 6.9                          | 8.7                                 | День           | 3                        |
| 23.03.2025 11:00        | 5                         | 7                            | 10.4                         | 35.08                               | День           | 3                        |
| 23.03.2025 14:00        | 6                         | 10                           | 9.9                          | 42.12                               | День           | 4                        |
| 23.03.2025 17:00        | 7                         | 10                           | 10.4                         | 22.5                                | День           | 4                        |
| 23.03.2025 20:00        | 5                         | 10                           | 9.3                          | -6.95                               | Сутінки        | 4                        |
| 23.03.2025 23:00        | 4                         | 6                            | 7.6                          | -33.05                              | Ніч            | 4                        |

Як видно з діаграми (рис. 3), розподіл значень є близьким до нормального, а найвища ймовірність стійкості атмосфери в Дніпрі (55%) відповідає четвертому класу, тобто стану байдужої стратифікації.

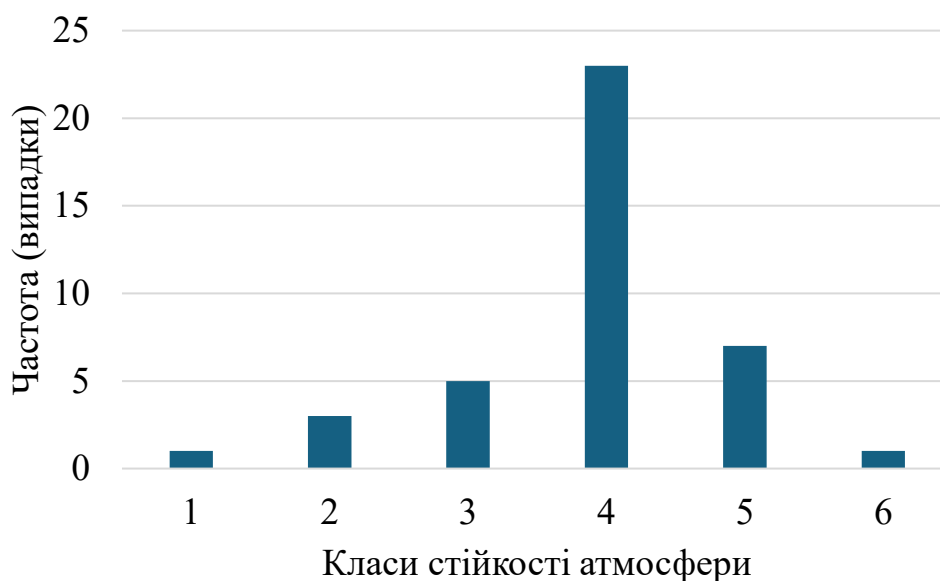


Рис. 3. Розподіл класів стійкості атмосфери м. Дніпро за період з 19–23 березня 2025

Слід зазначити, що саме для байдужої стратифікації адаптована більшість експрес-методик визначення параметрів розсіювання забруднювальних речовин. Це пояснюється тим, що в такому стані атмосфери вертикальні турбулентні потоки є найстабільнішими, що спрощує математичне моделювання поширення домішок.

Розроблений алгоритм може бути інтегрований у більш складні та точні моделі для вирішення широкого спектра завдань, пов'язаних із захистом атмосферного повітря від забруднення, зокрема:

- Прогнозувати погодні умови, несприятливі для розсіювання забруднюючих речовин, що дозволить підприємствам обґрунтовувати інтенсивність викидів на певний період часу.

- Обробка та інтерпретація даних інструментального моніторингу для створення карт полів середньомісячних і середньосезонних концентрацій забруднюючих речовин. Це дозволяє більш детально аналізувати рівень забруднення в різні періоди року та виявляти зони найбільшого накопичення шкідливих домішок.

- Удосконалення методів оперативного прогнозування рівня забруднення повітря у містах шляхом комплексного використання як експериментальних вимірювань, так і розрахункових моделей. Це особливо важливо для реагування на раптові зміни метеорологічних умов, що можуть спричиняти різке погіршення якості повітря.

- Оцінка впливу забруднення на здоров'я населення. Запропонована методика може бути використана для визначення зовнішнього впливу токсичних речовин на організм людини. При цьому враховуються особливості переміщення

населення, інтенсивність роботи промислових підприємств і трафік автотранспорту, що дозволяє оцінити потенційні ризики для різних вікових і соціальних груп населення.

Таким чином, запропонований підхід не лише підвищує точність оцінки стійкості атмосфери, а й відкриває нові можливості для екологічного моніторингу та прогнозування забруднення повітря. Це сприятиме розробці більш ефективних заходів щодо зниження негативного впливу викидів на довкілля та здоров'я людей. Урахування цих чинників є ключовим для розробки ефективних методів оцінки та прогнозування забруднення атмосферного повітря, що має важливе значення для екологічного моніторингу та прийняття управлінських рішень у сфері охорони довкілля

#### Перелік посилань

1. U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). *Air quality dispersion modeling – Preferred and recommended models*. <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models#aermod>
2. U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). *User's guide for the industrial source complex (ISC3) dispersion models, volume 2: Description of model algorithms*. <https://nepis.epa.gov>
3. CALPUFF Modeling System. (n.d.). <https://calpuff.org>
4. International Atomic Energy Agency. (1987). *Techniques and decision making in the assessment of off-site consequences of an accident in a nuclear facility* (Safety Series No. 86). International Atomic Energy Agency.
5. Держгідромет України. (2010). *Методичні вказівки щодо прогнозування метеорологічних умов формування рівнів забруднення повітря в містах України (КД 52.9.4.01-09)*. Наказ №77 від 14.12.2010.
6. Глушков, О. В., та ін. (2014). *Аналіз та прогнозування екологічного стану повітряного басейну промислових міст з урахуванням метеорологічних та антропогенних факторів: Нові математичні моделі та новітні експериментальні технології*. Одеський державний екологічний університет.
7. Полетаєва, Л. Н. (2016). Прогноз метеорологічних умов забруднення повітряного басейну Києва. *Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна. Серія: Екологія*, 14, 1–10.
8. Давидова, О. Ю., Писаревський, І. М., & Ладиженська, Р. С. (2012). *Управління якістю продукції та послуг у готельно-ресторанному господарстві: навч. посібник*. ХНАМГ.
9. Turner, B. (1961). Relationship between 24-hour mean air quality measurements and meteorological factors in Nashville, Tennessee. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 11, 483–489.
10. Pasquill, F. (1962). *Atmospheric diffusion*. Van Nostrand Co. Ltd.
11. Pasquill, F. (1976). Atmospheric dispersion parameters in Gaussian plume modeling: Part II. Possible requirements for change in the Turner workbook values (EPA-600/4-76-030b). U.S. Environmental Protection Agency.
12. Duffett-Smith, P. (1995). *Practical astronomy with your calculator* (3rd ed.). Cambridge University Press.
13. Meteoblue. (2024). Архів погоди Dnipro. [https://www.meteoblue.com/uk/weather/historyclimate/weatherarchive/dnipro\\_ukraine\\_709930?festlength=1m&year=2024&month=3](https://www.meteoblue.com/uk/weather/historyclimate/weatherarchive/dnipro_ukraine_709930?festlength=1m&year=2024&month=3)
14. Метеопост. (n.d.). МЕТЕОFOR\_Погода в аеропорту Дніпро сьогодні, прогноз погоди аеропорт Дніпро на сьогодні. <https://meteofor.com.ua/weather-dnipro-14408>

### ABSTRACT

**Goal.** To improve the methodology for predicting unfavorable meteorological conditions for the dispersion of pollutants based on the calculation of atmospheric stratification parameters according to synoptic forecasts.

**Methodology.** The study is based on the methods of mathematical modeling of atmospheric diffusion processes, analysis of empirical data and results of meteorological observations. Methods for determining the stability class of the surface atmospheric layer, calculating the coefficient of vertical turbulent exchange of impurities in it, and assessing the impact of weather conditions on the spread of pollutants were used. In addition, statistical data processing methods were used to improve the accuracy of atmospheric diffusion models.

**Research results.** An improved algorithm for calculating the vertical turbulent diffusion of pollutants in the atmosphere based on meteorological data is proposed. The algorithm takes into account wind parameters, temperature gradients, atmospheric stratification, and cloud cover. The developed approach allows to improve the accuracy of forecasts of pollutant concentrations in the urban environment, as well as to predict unfavorable weather conditions for dispersion.

**Scientific novelty.** The dependence between wind speed, cloud cover, the height of the Sun above the horizon and the vertical diffusion coefficient was revealed, which allows predicting unfavorable meteorological conditions for the dispersion of pollutants in the atmosphere. An improved algorithm for calculating the vertical turbulent diffusion of pollutants in the atmosphere is substantiated, which considers meteorological parameters and allows to improve the accuracy of modeling the processes of impurity distribution in the surface air layer.

**Practical significance.** Forecasting adverse meteorological conditions for a period of up to 3–7 days will allow industrial enterprises to adjust the intensity of pollutant emissions in advance, which will help reduce their impact on public health. The proposed approach can be used in environmental monitoring systems, in the development of pollution reduction strategies, and in research on modeling atmospheric processes. Considering meteorological factors in air pollution forecasting will contribute to more effective planning of measures to reduce harmful emissions and protect public health.

**Keywords:** *atmospheric diffusion models, sources of air pollution, industrial emissions, atmospheric stratification.*