

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

В. В. БЛАГОДАТНИЙ, Н. І. МАГАСЬ

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання практичних завдань з дисципліни
"Моделювання та прогнозування стану довкілля"**

У двох частинах

Частина 1

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електронне видання комбінованого
використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ • НУК • 2011

УДК 504.064.2 (076)
Б 68

Укладачі: В. В. Благодатний, канд. техн. наук, доцент;
Н. І. Магась, ст. викладач

Рецензент канд. техн. наук, доцент О.К. Чередніченко.

Кафедра екології

Електронний аналог друкованого видання:

Благодатний, В. В.

Б 68 Методичні вказівки до виконання практичних завдань з дисципліни
"Моделювання та прогнозування стану довкілля": у 2 ч. Частина 1
/ В. В. Благодатний, Н. І. Магась. – Миколаїв : Видавництво НУК, 2011.
– 50 с.

Наведено методики для визначення максимальної приземної концентрації забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери, поля концентрації шкідливої домішки, розсіювання забруднюючих речовин на місцевостях зі складним рельєфом, забруднення атмосферного повітря на промисловому майданчику з урахуванням впливу забудови. Висвітлено питання особливостей прогнозування забруднення повітря автотранспортом, а також поширення токсичних та радіоактивних домішок.

Призначено для студентів денної та заочної форм навчання зі спеціальності 6.040106 "Екологія, охорона навколишнього природного середовища та збалансоване природо-користування".

УДК 504.064.2 (076)

Навчальне видання

БЛАГОДАТНИЙ Володимир Валентинович

МАГАСЬ Наталія Іванівна

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до виконання практичних завдань з дисципліни
"Моделювання та прогнозування стану довкілля"**

У двох частинах

Частина 1

Комп'ютерне верстання *В.Г. Мазанко*

Коректор *М.О. Паненко*

© Благодатний В. В.,

Магась Н. І., 2011

© Видавництво НУК, 2011

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 2,9. Обсяг даних 1163 кб.

Тираж 14. Вид. № 14. Зам. № 399.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,
54025, м. Миколаїв, просп. Героїв Сталінграда, 9

E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідectво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

ВСТУП

Під прогнозуванням стану атмосферного повітря розуміють визначення його параметрів (в тому числі концентрацій шкідливих домішок) у певних точках. Ці параметри можуть визначатися у просторі (тривимірне завдання), на площині (двохвимірне завдання), по осі факела викиду, або в певних контрольних точках.

Математичні моделі, що лежать в основі сучасних прикладних наукових програм прогнозування стану атмосфери базуються на розв'язанні рівнянь турбулентної дифузії за допомогою чисельних методів. На сьогодні найпоширенішими є дифузійна та гауссова моделі.

Проведення практичних розрахунків розсіювання в Україні здійснюється за програмою ЕОЛ+, рекомендованою Міністерством охорони навколишнього природного середовища України. В основі цієї програми лежить Методика розрахунку концентрацій в атмосферному повітрі шкідливих речовин, що містяться у викидах підприємств (ОНД-86), що містить спрощені методики розрахунку горизонтального (у двометровому шарі над поверхнею землі) та вертикального розподілу концентрацій при викидах від одиночного точкового джерела, лінійного джерела, групи джерел і майданчикових джерел, а також мінімальну висоту джерела викиду, гранично – допустимі викиди і межі санітарно – захисної зони підприємств [2]. За наявності перешкод поширенню повітряних мас або ефекту сумації шкідливої дії декількох речовин до цих методик слід вносити поправки.

Свого часу, для визначення забруднення атмосферного повітря затіненими точковими джерелами Ельтерманом було запропоновано методику, що дозволяє врахувати підйом викиду над отвором труби як інерційними силами, так і силами витіснення; визначати величину і місце знаходження максимальної концентрації у завітреній та єдиній циркуляційній зоні. Ця методика набула застосування у хімічній та нафтопереробній промисловості.

При аналізі забруднення повітря значної уваги заслуговують випадки наземних лінійних джерел, до яких належить автотранспорт. Специфічний характер забруднення пересувними джерелами, розосередженими у просторі, а також нерівномірність руху потоку автотранспорту зумовили розробку спеціальних методик.

Поширення небезпечних речовин в атмосфері при аварійних викидах суттєво відрізняється від викидів при стаціонарній роботі димових труб. Тому для прогнозування забруднення токсичними та радіоактивними речовинами використовують модель Пасквіла–Гіффорда, що прийнята міжнародною агенцією з атомної енергії, як робоча модель.

Виконання студентами практичних робіт з дисципліни «Моделювання та прогнозування стану довкілля» передбачає оволодіння теоретичними основами існуючих моделей, вміннями та навичками розв'язання наведених завдань.

Матеріали методичних вказівок можуть бути використані студентами денної та заочної форми навчання спеціальності 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього природного середовища та збалансоване природокористування» при виконанні курсових робіт з дисциплін: «Моделювання та прогнозування стану довкілля», «Джерела забруднення навколишнього середовища», «Техноекологія», «Природоохоронні технології» та при написанні дипломних робіт.

Практична робота № 1

Розрахунок максимальної приземної концентрації шкідливої домішки

Прогнозування забруднення атмосферного повітря ґрунтується на результатах теоретичного та експериментального вивчення закономірностей поширення домішок, що викидаються джерелами забруднення атмосфери. Одним з найпоширеніших підходів до моделювання базується на розв'язанні рівняння турбулентної дифузії. Він дозволяє досліджувати поширення домішок від джерел різного типу за різних характеристик середовища із врахуванням метеорологічних умов.

У загальному вигляді завдання прогнозу забруднення повітря математично може бути описане диференціальним рівнянням за певних початкових і граничних умов:

$$\frac{dC}{dt} + \sum_{i=1}^3 u_i \cdot \frac{dC}{dx_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{d}{dx_i} \cdot k_i \cdot \frac{dC}{dx_i} - a \cdot C, \quad (1.1)$$

де C – концентрація домішки у приземному шарі повітря; t – час; x – координати; u_i – складові середньої швидкості переміщення домішки; k_i – складові коефіцієнта обміну; $i = 1, 2, 3$ – напрями осей координат; a – коефіцієнт, що визначає зміну концентрації за рахунок перетворення домішки.

У декартовій системі координат, горизонтальним осям x_1 і x_2 відповідають x і y , а вертикальній $x_3 = z$, відповідно швидкості $u_1 = u$; $u_2 = v$; $u_3 = w$ коефіцієнти обміну $k_1 = k_x$; $k_2 = k_y$; $k_3 = k_z$ [7].

Тоді рівняння (1.1) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} + u \cdot \frac{dC}{dx} + v \cdot \frac{dC}{dy} + w \cdot \frac{dC}{dz} = \frac{d}{dx} \cdot k_x \cdot \frac{dC}{dx} + \\ + \frac{d}{dy} \cdot k_y \cdot \frac{dC}{dy} + \frac{d}{dz} \cdot k_z \cdot \frac{dC}{dz} - a \cdot C. \end{aligned} \quad (1.2)$$

При розв'язанні практичних завдань вигляд рівняння (1.2) спрощується.

Якщо вісь x зорієнтована у напрямку середньої швидкості вітру, то $v = 0$.

Якщо домішка легка і її вертикальною швидкістю переміщення можна знехтувати, тобто $w = 0$.

Якщо розглядається важка домішка, що поступово осідає в атмосфері під впливом гравітаційних сил, то w – є швидкістю осідання, яка входить у рівняння із знаком мінус.

За наявності вітру можна знехтувати членом з k_x , що враховує дифузію, по осі x , оскільки в цьому напрямку дифузійний потік домішки значно менше конвективного.

Якщо період часу порівняний з часом перенесення домішки x/u від джерела до контрольної точки, процес дифузії стає близьким до стаціонарного. Тому можна прийняти $dC/dt = 0$, і коефіцієнти рівняння (1.2) вважати відомими.

ми функціями часу t . Врахування цього члена є істотним тільки при визначенні екстремальних концентрацій домішки від наземних джерел за умов дуже слабкого вітру та малої інтенсивності турбулентного обміну [7].

В роботах під керівництвом професора М.Є. Берлянда було отримано аналітичний розв'язок рівняння дифузії для випадку, коли u і k_z задані ступеневими функціями від z ($u = u_1 \cdot z^n$; $k_z = k_1 \cdot z$).

Для легкої домішки ($w = a = 0$) приземна концентрація (при $z = 0$):

$$C = \frac{M}{2 \cdot (1+n) \cdot k_1 \sqrt{\pi \cdot k_0 \cdot x^3}} \cdot e^{\frac{u_1 \cdot H^{1+n}}{(1+n)^2 \cdot k_1 \cdot x} - \frac{y^2}{4 \cdot k_0 \cdot x}}, \quad (1.3)$$

де M – викид речовини від джерела за одиницю часу мг/с; H – висота джерела викиду, м; n – коефіцієнт, що залежить від температурної стратифікації; k_1 – коефіцієнт турбулентності на висоті 1 м; k_0 – коефіцієнт, м; u_1 – швидкість вітру на висоті 1 м, м/с.

Коефіцієнт k_0 приймається за умов стійкої стратифікації атмосфери $k_0 = 0,5 \div 1$ м, нестійкої $k_0 = 0,1 \div 0,5$.

Коефіцієнт n приймається за умов стійкої стратифікації атмосфери $n = 0,15 \div 0,50$, а нестійкої $n = 0,1 \div 0,15$.

Шляхом розв'язання рівняння 1.3 отримано профіль зміни концентрації домішки по осі факела викиду. Спочатку вміст забруднюючих речовин невеликий і повільно зростає, що відповідає зоні перекидання факела (рис.1). У цій зоні, безпосередньо біля джерела організованого викиду, забруднення відбувається лише за рахунок викидів з неорганізованих джерел, тому вона називається зоною неорганізованого забруднення атмосферного повітря. По мірі віддалення від труби у напрямку поширення промислових викидів димова хмара при тискується до поверхні землі за рахунок перенесення повітряними масами і поступового розширення факела, утворюється зона задимлення з максимальним значенням приземної концентрації забруднюючих речовин.

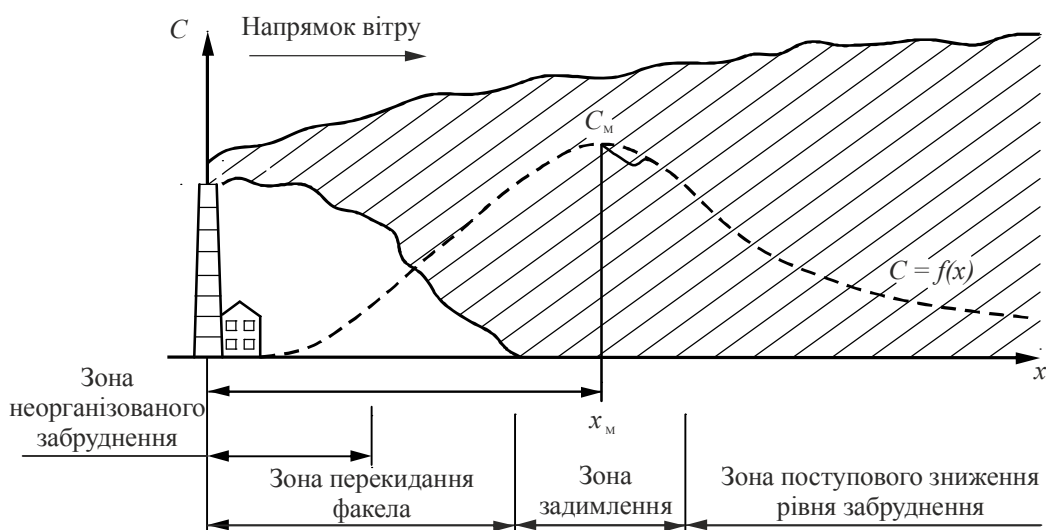


Рис. 1.1. Розподіл приземної концентрації забруднюючої речовини в атмосфері по осі факела викиду точкового джерела

Ця зона є найбільш небезпечною для населення і має бути виключена з селітебної забудови. Останньою є зона поступового зниження рівня забруднення атмосферного повітря.

Характерною особливістю розподілу приземної концентрації C по осі x є наявність її максимуму C_m на відстані x_m від джерела. Ці величини визначаються за умови $\frac{dC}{dx} = \frac{dC}{dy} = 0$ за формулами [3]:

$$C_m = \frac{0,116 \cdot (1+n)^2 \cdot M}{u_1 \cdot H^{1,5 \cdot (1+n)}} \cdot \sqrt{\frac{k_1}{u_1 \cdot k_0}}, \quad (1.4)$$

$$x_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{u_1 \cdot H^{1+n}}{k_1 \cdot (1+n)^2}. \quad (1.5)$$

Ці висновки увійшли до нормативного документа ОНД-86 «Методика розрахунку концентрацій в атмосферному повітрі шкідливих речовин, що містяться у викидах підприємств». Вона дозволяє здійснювати розрахунки розсіювання домішок, що викидаються в атмосферу одиночними точковими, лінійними і групою джерел, з врахуванням впливу рельєфу місцевості, визначати граничні концентрації забруднюючих речовин в двометровому шарі над поверхнею землі, а також вертикальний розподіл концентрацій.

Найбільше значення концентрації забруднюючої речовини C_m (мг/м³), що викидається з одиночного джерела з круглим отвором за несприятливих метеорологічних умов (НМУ), встановлюється за формулою [1, 2]

$$C_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}}. \quad (1.6)$$

Основними складовими, що входять до формули (1.6) є:

A – коефіцієнт, що залежить від температурної стратифікації атмосфери та визначає умови горизонтального розсіювання атмосферних домішок. Для території України північніше 50° пн.ш. $A = 160$; для джерел у зоні від 50 до 52° пн.ш. $A = 180$; південніше 50° пн.ш. $A = 200$.

M – потужність викиду, г/с.

F – безрозмірний коефіцієнт, що враховує швидкість осідання шкідливих речовин у повітрі. Для газоподібних забруднюючих речовин і дрібнодисперсних аерозолів, швидкість осідання яких практично дорівнює нулю $F = 1$, а для решти аерозолів при ефективності очищення викидів не менш ніж 90 % – $F = 2$; від 75 до 90 % – $F = 2,5$; менше 75 % або за відсутності очищення – $F = 3$.

η – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив рельєфу місцевості на розсіювання домішок. У випадку рівної місцевості або якщо місцевість має перепади висот не більше 50 метрів на 1 км $\eta = 1$.

H – висота джерела викиду над рівнем землі (для наземних джерел $H = 2$ м), м.

ΔT (°C) – різниця між температурою газоповітряної суміші – T_r , що викидається з отвору джерела, і температурою атмосферного повітря – T_a . Температуру атмосферного повітря T_a (°C) приймають рівною середній температурі атмосферного повітря найбільш жаркого місяця року за СНиП 2.01.01-82, а температуру газоповітряної суміші T_r (°C) – за діючими для технологічного процесу нормативами з урахуванням підсмоктування повітря та охолодження викидів у випадку застосування мокрого пило та газоочищення. Для котелень, що працюють за опалювальним графіком, допускається при розрахунках приймати значення T_a рівним середній температурі повітря у найхолодніший період.

V_1 – об'ємна витрата газоповітряної суміші, м³/с. Розраховують за формулою

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot w_0, \quad (1.7)$$

де D – діаметр отвору джерела викиду, м; w_0 – середня швидкість виходу газоповітряної суміші з отвору джерела викиду, м/с.

m та n – безрозмірні характеристики умов виходу газоповітряної суміші з отвору джерела викиду.

Значення коефіцієнтів m та n розраховують в залежності від параметрів f , V_m , V'_m , f_e :

$$f = 1000 \cdot \frac{w_0^2 \cdot D}{H^2 \cdot \Delta T}; \quad (1.8)$$

$$V_m = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta T}{H}}; \quad (1.9)$$

$$V'_m = 1,3 \cdot \frac{w_0 \cdot D}{H}; \quad (1.10)$$

$$f_e = 800 \cdot (V'_m)^3. \quad (1.11)$$

Коефіцієнт m визначають в залежності від f за формулами:

$$\text{якщо } f < 100 \quad m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{f} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{f}}, \quad (1.12)$$

$$\text{якщо } f \geq 100 \quad m = \frac{1,47}{\sqrt[3]{f}}. \quad (1.13)$$

Якщо $f_e < f < 100$, значення коефіцієнта m встановлюють при $f = f_e$.

Коефіцієнт n при $f < 100$ визначають в залежності від V_m за формулами:

$$\text{якщо } V_m \geq 2 \quad n = 1; \quad (1.14)$$

$$\text{якщо } 0,5 \leq V_m < 2 \quad n = 0,532 \cdot V_m^2 - 2,13 \cdot V_m + 3,13; \quad (1.15)$$

$$\text{якщо } V_m < 0,5 \quad n = 4,4 \cdot V_m. \quad (1.16)$$

Максимальна приземна концентрація шкідливих речовин C_m при викиді холодної газоповітряної суміші з круглого отвору одиночного джерела при НМУ, при $f > 100$ або $T \cong 0$ та $V_m \geq 0,5$, визначається за формулою

$$C_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot n \cdot \eta}{H^{\frac{4}{3}}} \cdot K, \quad (1.17)$$

де
$$K = \frac{D}{8V_1} = \frac{1}{7,1 \cdot \sqrt{w_0 \cdot V_1}}. \quad (1.18)$$

Відстань x_m (м) від джерела викидів, на якій C_m за НМУ досягає найбільшого значення, знаходять за формулою

$$x_m = \frac{5 - F}{4} \cdot d \cdot H, \quad (1.19)$$

де d – безрозмірний коефіцієнт, який при $f < 100$ розраховують за формулами:

якщо $V_m \leq 0,5$,
$$d = 2,48 \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f}); \quad (1.20)$$

якщо $0,5 < V_m \leq 2$,
$$d = 4,95 \cdot V_m \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f}); \quad (1.21)$$

якщо $V_m > 2$,
$$d = 7 \cdot \sqrt{V_m} \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f}). \quad (1.22)$$

Якщо $f > 100$ або $T \cong 0$ значення d знаходять за формулами:

якщо $V'_m \leq 0,5$
$$d = 0,5; \quad (1.23)$$

якщо $0,5 < V'_m \leq 2$
$$d = 11,4 V'_m; \quad (1.24)$$

якщо $V'_m > 2$
$$d = 16 \cdot \sqrt{V'_m}. \quad (1.25)$$

Проведення практичних розрахунків розсіювання в Україні здійснюється за програмою ЕОЛ+, рекомендованою Міністерством охорони навколишнього природного середовища України, в основі якої лежить Методика розрахунку концентрацій в атмосферному повітрі шкідливих речовин, що містяться у викидах підприємств (ОНД–86) [2].

Приклад 1.1. Визначити максимальну приземну концентрацію шкідливих речовин, що викидаються з димової труби котельної, розміщеної на відкритій рівній місцевості у м. Миколаїв, в атмосферному повітрі в районі джерела їх викиду за несприятливих метеорологічних умов, та відповідну їй відстань від джерела викиду.

Вихідні дані:

Характеристика джерела викидів забруднюючих речовин у атмосферне повітря

№ з/п	H , м	D , м	Координати джерела, м		w_0 , м/с	T_g , °C	Назва речовини	М, г/с
			X	Y				
1	45	1,3	44	113	7	127	Ангідрид сірчистий	16

Метеорологічні характеристики і коефіцієнти, які визначають умови розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі: середня максимальна температура зовнішнього повітря найжаркішого місяця року – 27 °С.

Розв'язок

1. Згідно з умовами завдання приймаємо коефіцієнт температурної стратифікації атмосфери $A = 200$; коефіцієнт рельєфу місцевості $\eta = 1$.

2. За формулою (1.7) визначаємо об'ємну витрату газоповітряної суміші

$$V_1 = \frac{3,14 \cdot 1,3^2}{4} \cdot 7 = 9,3 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Приймаємо температуру навколишнього середовища рівною температурі найжаркішого місяця. Тоді перегрів газоповітряної суміші

$$\Delta T = T_r - T_a = 127 - 27 = 100^\circ\text{C}.$$

4. За формулою (1.8) визначаємо параметр

$$f = 1000 \cdot \frac{7^2 \cdot 1,3}{45^2 \cdot 100} = 0,31.$$

5. За формулою (1.9) визначаємо параметр

$$V_m = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{9,3 \cdot 100}{45}} = 1,78.$$

6. За формулою (1.10) визначаємо параметр

$$V'_m = 1,3 \cdot \frac{7 \cdot 1,3}{45} = 0,26.$$

7. За формулою (1.11) визначаємо параметр

$$f_e = 800 \cdot (0,26)^3 = 14,06.$$

8. Оскільки параметр $f < 100$, то за формулою (1.12) визначаємо коефіцієнт

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{0,31} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{0,31}} = 1,32.$$

9. Оскільки $0,5 \leq V_m < 2$, то коефіцієнт n визначається за формулою (1.15):

$$n = 0,532 \cdot 1,78^2 - 2,13 \cdot 1,78 + 3,13 = 1,02.$$

10. За формулою (1.6) визначаємо максимальну концентрацію сірчистого ангідриду

$$C_m(\text{SO}_2) = \frac{200 \cdot 16 \cdot 1 \cdot 1,32 \cdot 1,02 \cdot 1}{45^2 \cdot \sqrt[3]{9,3 \cdot 100}} = 0,22 \text{ мг/м}^3.$$

11. Оскільки $f < 100$ та $V_M < 2$, безрозмірний коефіцієнт d визначаємо за формулою (1.22)

$$d = 7 \cdot \sqrt{1,78} \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{0,31}) = 11,11.$$

12. За формулою (1.19) визначаємо відстань від джерела викиду, на якій приземна концентрація за НМУ має найбільше значення

$$x_{M(SO_2)} = \frac{5-1}{4} \cdot 11,11 \cdot 45 = 499,9 \text{ м} \approx 500 \text{ м}.$$

Практична робота № 2

Розрахунок поля концентрації шкідливої домішки

Розрахунок поля концентрації шкідливої домішки проводиться в наступній послідовності.

Спочатку визначається небезпечна швидкість вітру u_M (м/с) на рівні флюгера (приблизно 10м від землі), при якій приземна концентрація забруднюючих речовин в атмосферному повітрі має найбільше значення, при $f < 100$ за формулами:

$$\text{при } V_M \leq 0,5 \quad u_M = 0,5; \quad (2.1)$$

$$\text{при } 0,5 < V_M \leq 2 \quad u_M = V_M; \quad (2.2)$$

$$\text{при } V_M > 2 \quad u_M = V_M \cdot (1 + 0,12 \cdot \sqrt{f}). \quad (2.3)$$

При $f > 100$ або $T \cong 0$ значення u_M розраховується за формулами:

$$\text{при } V'_M \leq 0,5 \quad u_M = 0,5; \quad (2.4)$$

$$\text{при } 0,5 < V'_M \leq 2 \quad u_M = V'_M; \quad (2.5)$$

$$\text{при } V'_M > 2 \quad u_M = 2,2 \cdot V'_M. \quad (2.6)$$

За формулою (1.6) або (1.17) визначається максимальне значення приземної концентрації шкідливої речовини C_M (мг/м³) при небезпечній швидкості вітру u_M (м/с).

Якщо розрахункова швидкість вітру u (м/с), відрізняється від небезпечної, то визначається максимальне значення приземної концентрації шкідливої речовини $C_{ми}$ (мг/м³) за несприятливих метеорологічних умов за формулою

$$C_{ми} = r \cdot C_M, \quad (2.7)$$

де r – безрозмірна величина, що залежить від відношення u/u_M і розраховується за формулами:

$$\text{якщо } u/u_M \leq 1 \quad r = 0,67(u/u_M) + 1,67(u/u_M)^2 - 1,34(u/u_M)^3; \quad (2.8)$$

$$\text{якщо } u/u_M > 1 \quad r = \frac{3(u/u_M)}{2(u/u_M)^2 - (u/u_M) + 2}. \quad (2.9)$$

Відстань від джерела викиду x_{Mu} (м), на якій при швидкості вітру u і несприятливих метеорологічних умов приземна концентрація шкідливих речовин досягає максимального значення C_{Mu} (мг/м³), визначається за формулою

$$x_{Mu} = p \cdot x_M, \quad (2.10)$$

де p – безрозмірний коефіцієнт, що залежить від відношення u/u_M і розраховується за формулами:

$$\text{при } u/u_M \leq 0,25 \quad p = 3; \quad (2.11)$$

$$\text{при } 0,25 < u/u_M \leq 1 \quad p = 8,43(1 - u/u_M)^3 + 1; \quad (2.12)$$

$$\text{при } u/u_M > 1 \quad p = 0,32u/u_M + 0,68. \quad (2.13)$$

Знаючи значення максимальної приземної концентрації C_M домішки та небезпечну відстань від джерела x_M , на якій вона спостерігається, визначають приземні концентрації по осі факела викиду C_x (мг/м³) при небезпечній швидкості вітру на різних відстанях x (м) від джерела викиду за формулою

$$C_x = S_1 \cdot C_M, \quad (2.14)$$

де S_1 – безрозмірний коефіцієнт.

Формула для визначення S_1 обирається в залежності від співвідношення між відстанями x та x_M

$$\text{якщо } \frac{x}{x_M} \leq 1 \quad S_1 = 3 \cdot \left(\frac{x}{x_M}\right)^4 - 8 \cdot \left(\frac{x}{x_M}\right)^3 + 6 \cdot \left(\frac{x}{x_M}\right)^2; \quad (2.15)$$

$$\text{якщо } 1 < \frac{x}{x_M} \leq 8 \quad S_1 = \frac{1,13}{0,13\left(\frac{x}{x_M}\right)^2 + 1}. \quad (2.16)$$

У тому випадку, коли співвідношення $x/x_M \geq 8$, формула для визначення безрозмірного коефіцієнта S_1 обирається в залежності від коефіцієнта F .

$$\text{при } \frac{x}{x_M} \geq 8 \text{ і } F \leq 1,5 \quad S_1 = \frac{\frac{x}{x_M}}{3,58 \cdot \left(\frac{x}{x_M}\right)^2 - 35,2 \cdot \left(\frac{x}{x_M}\right) + 120} ; \quad (2.17)$$

$$\text{при } \frac{x}{x_M} \geq 8 \text{ і } F > 1,5 \quad S_1 = \frac{1}{0,1 \cdot \left(\frac{x}{x_M}\right)^2 + 2,47 \cdot \left(\frac{x}{x_M}\right) + 17,8} . \quad (2.18)$$

Потім для кожного значення x розраховуються приземні концентрації забруднюючої речовини в атмосферному повітрі $C_{x,y}$ (мг/м³) на різних відстанях y (м) по перпендикуляру до осі факела викиду за формулою

$$C_{x,y} = S_2 \cdot C_x . \quad (2.19)$$

Для розрахунку безрозмірного коефіцієнта S_2 необхідно визначити значення параметра t_y , згідно зі швидкістю вітру u (м/с):

$$\text{при } u \leq 5 \quad t_y = \frac{u \cdot y^2}{x^2} ; \quad (2.20)$$

$$\text{при } u > 5 \quad t_y = \frac{5 \cdot y^2}{x^2} . \quad (2.21)$$

Тоді

$$S_2 = \frac{1}{\left(1 + 5 \cdot t_y + 12,8 \cdot t_y^2 + 17 \cdot t_y^3 + 45,1 \cdot t_y^4\right)^2} . \quad (2.22)$$

У тому випадку, коли розрахункова швидкість вітру u (м/с), відрізняється від небезпечної швидкості вітру u_M (м/с), то у формулах замість значень C_M і x_M підставляють значення C_{Mi} і x_{Mi} .

Приклад 2. Розрахувати поле концентрацій при небезпечній швидкості вітру і несприятливих метеорологічних умовах за умовами прикладу 1 для відстаней по осі факела $x = 50, 100, 200, 400, 1000, 3000$ та по перпендикуляру до осі факела $y = 50, 100, 150, 200, 400$.

Розв'язок

1. Оскільки виконується умова, що безрозмірний параметр $0,5 < V_M < 2$, то небезпечна швидкість вітру визначається за формулою (2.2)

$$u_M = 1,78 \text{ м/с.}$$

2. За формулами (2.15, 2.16) визначаємо коефіцієнт S_1 для відстані x

$$x = 50 \text{ м, } x/x_M = 0,1 \quad S_1 = 3 \cdot (0,1)^4 - 8 \cdot (0,1)^3 + 6 \cdot (0,1)^2 = 0,052;$$

$$x = 100 \text{ м, } x/x_M = 0,2 \quad S_1 = 3 \cdot (0,2)^4 - 8 \cdot (0,2)^3 + 6 \cdot (0,2)^2 = 0,176;$$

$$x = 200 \text{ м, } x/x_M = 0,4 \quad S_1 = 3 \cdot (0,4)^4 - 8 \cdot (0,4)^3 + 6 \cdot (0,4)^2 = 0,525;$$

$$x = 400 \text{ м, } x/x_M = 0,8 \quad S_1 = 3 \cdot (0,8)^4 - 8 \cdot (0,8)^3 + 6 \cdot (0,8)^2 = 0,973;$$

$$x = 1000 \text{ м, } x/x_M = 2 \quad S_1 = \frac{1,13}{0,13 \cdot (2)^2 + 1} = 0,743;$$

$$x = 3000 \text{ м, } x/x_M = 6 \quad S_1 = \frac{1,13}{0,13 \cdot (6)^2 + 1} = 0,199.$$

3. За формулою (2.14) визначаємо концентрацію сірчистого ангідриду в атмосферному повітрі C_x уздовж осі факела викиду на різних відстанях x від джерела викиду:

$$x = 50 \text{ м, } C = 0,052 \cdot 0,22 = 0,011 \text{ мг/м}^3;$$

$$x = 100 \text{ м, } C = 0,176 \cdot 0,22 = 0,039 \text{ мг/м}^3;$$

$$x = 200 \text{ м, } C = 0,525 \cdot 0,22 = 0,116 \text{ мг/м}^3;$$

$$x = 400 \text{ м, } C = 0,973 \cdot 0,22 = 0,214 \text{ мг/м}^3;$$

$$x = 1000 \text{ м, } C = 0,743 \cdot 0,22 = 0,163 \text{ мг/м}^3;$$

$$x = 3000 \text{ м, } C = 0,199 \cdot 0,22 = 0,044 \text{ мг/м}^3.$$

4. Визначаємо значення аргумента t_y . Оскільки $u \leq 5$ значення аргумента t_y визначаємо за формулою (2.20)

$$\text{при } x = 50 \text{ м, } y = 50 \text{ м} \quad t_y = \frac{2,2 \cdot 50^2}{50^2} = 2,2;$$

$$\text{при } x = 100 \text{ м, } y = 50 \text{ м} \quad t_y = \frac{2,2 \cdot 50^2}{100^2} = 0,5;$$

$$\text{при } x = 150 \text{ м, } y = 50 \text{ м} \quad t_y = \frac{2,2 \cdot 50^2}{200^2} = 0,14.$$

5. За формулою (2.22) розраховуємо безрозмірний коефіцієнт:

при $x = 50 \text{ м, } y = 50 \text{ м}$

$$S_2 = \frac{1}{\left(1 + 5 \cdot 2,2 + 12,8 \cdot 2,2^2 + 17 \cdot 2,2^3 + 45,1 \cdot 2,2^4\right)^2} = 5,8 \cdot 10^{-7};$$

при $x = 100$ м, $y = 50$ м

$$S_2 = \frac{1}{\left(1 + 5 \cdot 0,5 + 12,8 \cdot 0,5^2 + 17 \cdot 0,5^3 + 45,1 \cdot 0,5^4\right)^2} = 0,007;$$

при $x = 200$ м, $y = 50$ м

$$S_2 = \frac{1}{\left(1 + 5 \cdot 0,14 + 12,8 \cdot 0,14^2 + 17 \cdot 0,14^3 + 45,1 \cdot 0,14^4\right)^2} = 0,25.$$

6. За формулою (2.19) визначаємо приземну концентрацію забруднюючої речовини в атмосферному повітрі $C_{x,y}$ (мг/м³) на відстані y (м) по перпендикуляру до осі факела викиду

при $x = 50$ м, $y = 50$ м

$$C_{50,50} = 5,8 \cdot 10^{-7} \cdot 0,011 \approx 0 \text{ мг/м}^3;$$

при $x = 100$ м, $y = 50$ м

$$C_{100,50} = 0,007 \cdot 0,039 = 0,0003 \text{ мг/м}^3;$$

при $x = 200$ м, $y = 50$ м

$$C_{200,50} = 0,25 \cdot 0,116 = 0,029 \text{ мг/м}^3.$$

.....

У таблиці 1 представлено результати розрахунків та побудовано поле концентрацій сірчистого ангідриду при небезпечній швидкості вітру.

Таблиця 2.1. Поле концентрації SO₂ при небезпечній швидкості вітру і несприятливих метеорологічних умовах ($C_{x,y}$, мг/м³)

y , м	x , м						
	50	100	200	400	800	1000	3000
0	0,013	0,043	0,120	0,190	0,150	0,130	0,033
50	0	0,0003	0,029	0,135	0,137	0,122	0,033
100	0	0	0,0005	0,047	0,106	0,104	0,032
150	0	0	0	0,009	0,075	0,072	0,031
200	0	0	0	0	0,038	0,052	0,031
400	0	0	0	0	0	0,004	0,022

Практична робота № 3

Моделювання розсіювання забруднюючих речовин на місцевості зі складним рельєфом

Нерівності місцевості суттєво впливають на характер руху і турбулентний режим повітряних потоків і, відповідно, на розподіл концентрацій шкідливих домішок від джерел викиду. Зокрема у понижених формах рельєфу утворюються застійні зони з підвищеним вмістом забруднюючих речовин. Викиди підприємств, розташованих у понижених формах рельєфу можуть

призводити до утворення зон високої концентрації забруднювачів у навколишніх житлових масивах, розташованих на підвищених точках місцевості [1, 8].

У таких випадках значення коефіцієнту рельєфу місцевості η у формулі (1.6) будуть відмінними від 1. Їх встановлюють на основі аналізу картографічного матеріалу, що характеризує рельєф місцевості у радіусі до 50 висот найбільш високого з розміщуваних на проммайданчику джерела, але не менше 2 км.

Якщо навколо даного джерела викидів (підприємства) можна виділити окремі ізольовані перешкоди, витягнуті в одному напрямі (балка (впадина), хребет (пагорб), уступ), то поправочний коефіцієнт на рельєф η визначається за формулою

$$\eta = 1 + \varphi_1 (\eta_m - 1), \quad (3.1)$$

де η_m визначається за таблицею 3.1. в залежності від форм рельєфу, перерізи яких представлені на рис. 3.1. і безрозмірних величин n_1 і n_2 , що визначаються за формулами:

$$n_1 = H/h_0; \quad (3.2)$$

$$n_2 = a_0/h_0 \quad (3.3)$$

(n_1 визначається з точністю до десятих, а n_2 - з точністю до цілих).

Таблиця 3.1

n_1	Балка (западина)				Уступ				Хребет (пагорб)			
	n_2											
	4 – 5	6 – 9	10 – 15	16 – 20	4 – 5	6 – 9	10 – 15	16 – 20	4 – 5	6 – 9	10 – 15	16 – 20
< 0,5	4,0	2,0	1,6	1,3	3,5	1,8	1,5	1,2	3,0	1,5	1,4	1,2
0,6 – 1	3,0	1,6	1,5	1,2	2,7	1,5	1,3	1,2	2,2	1,4	1,3	1,0
1,1 – 2,9	1,8	1,5	1,4	1,1	1,6	1,4	1,2	1,1	1,4	1,3	1,2	1,0
3 – 5	1,4	1,3	1,2	1,0	1,3	1,2	1,1	1,0	1,2	1,2	1,1	1,0
> 5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

У формулах (3.2), (3.3) H – висота джерела, м; h_0 – висота (глибина) перешкоди, м; a_0 – напівширина пагорба, балки або довжина бокового схилу уступу, м; x_0 – відстань до джерела: для пагорба або балки – від середини перешкоди; для уступу – від верхньої кромки схилу, як вказано на рис. 3.1. Значення функції φ_1 визначається в залежності від відношення $|x_0|/a_0$ за графіками (рис. 3.1), що відповідають різним формам рельєфу. Якщо джерело розташоване на верхньому плато уступу, як аргумент функції φ_1 замість $\frac{|x_0|}{a_0}$

приймається $-\frac{|x_0|}{a_0}$ [1].

Якщо перешкоди є хребтами (балками), витягнутими в одному напрямку, значення h_0 і a_0 визначаються для поперечного перерізу, перпендикулярного

цьому напрямку. Якщо ізольована перешкода є окремим пагорбом (впадиною) то h_0 вибирається відповідним максимальній (мінімальній) відмітці перешкоди, а n_2 – максимальній крутості схилу, по відношенню до джерела.

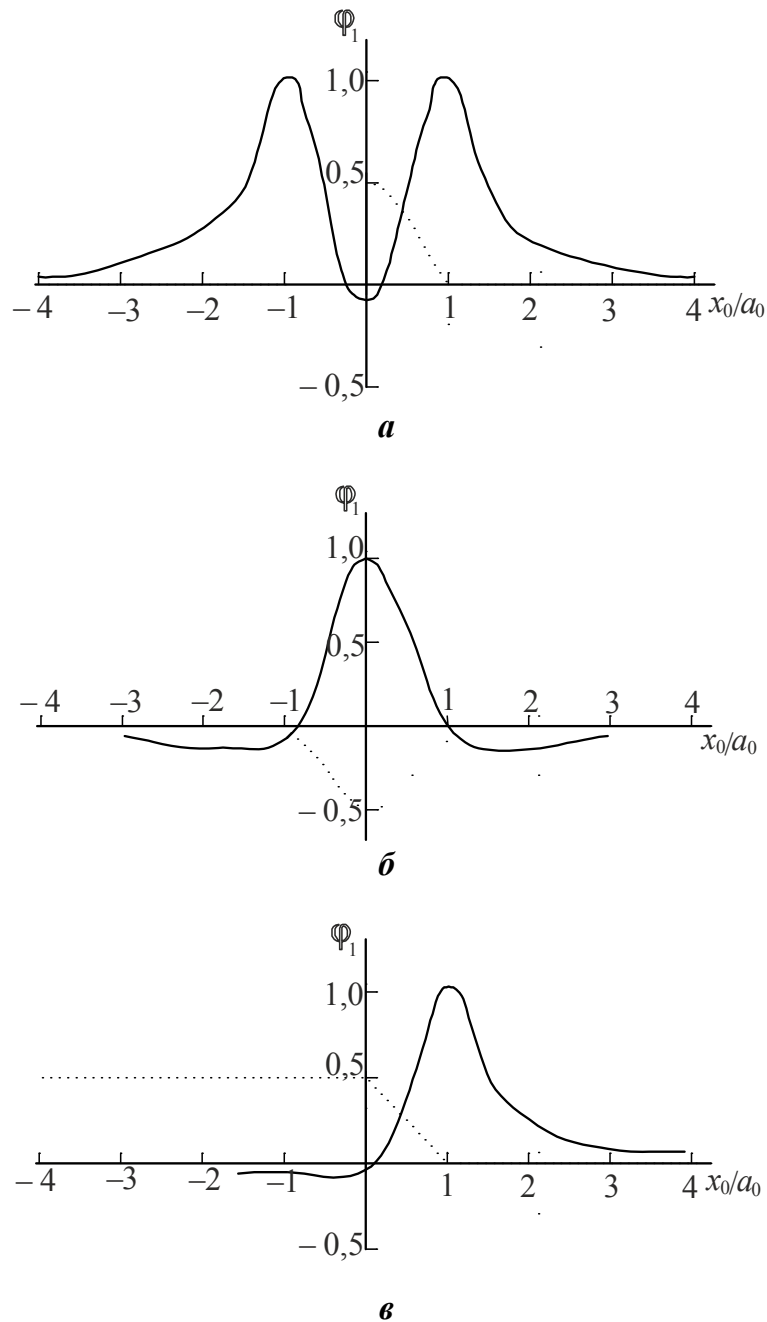


Рис. 3.1. Типи рельєфу місцевості для урахування поправок при розрахунках розсіювання шкідливих речовин у атмосферному повітрі:
а – хребет (пагорб); **б** – балка (западина); **в** – уступ

Для джерел викиду, розташованих в зоні впливу декількох ізольованих перешкод, визначаються значення η для кожної перешкоди і використовується максимальне з них.

При визначенні відстані від джерела викидів, на якій спостерігатиметься максимальна приземна концентрація домішки, з урахуванням впливу рельєфу місцевості формула (1.19) набуває вигляду:

$$x'_M = \frac{5-F}{4} \cdot d \cdot \frac{1,1}{\sqrt{\eta+0,2}} \cdot H. \quad (3.4)$$

При розрахунку приземних концентрацій по осі факела викиду на різних відстанях від джерела вплив рельєфу місцевості враховується для відстаней x від джерела, що відповідають умові:

$$x < 6,2 \cdot x_M \cdot \sqrt{\eta-1}. \quad (3.5)$$

Якщо ця умова виконується, то у формули для визначення S_1 при обчисленні відношення x/x_M замість значення x_M підставляємо x'_M .

Приклад 3. Визначити вплив рельєфу місцевості при розрахунку концентрації забруднюючих речовин, що викидаються від одиночного точкового джерела. Котельня з тими ж параметрами і при тих самих умовах, що у практичній роботі № 1, розміщена у балці. Глибина балки, $h_0 = 70$ м; напівширина балки, $a_0 = 600$ м. Відстань від середини балки до джерела, $x_0 = 200$ м. Вітер направлений по перпендикуляру до балки.

Згідно з розрахунками у прикладі 1 (для рівної місцевості) для двоокису сірки $C_M(\text{SO}_2) = 0,22 \text{ мг/м}^3$, $x_M(\text{SO}_2) = 500$ м.

Розв'язок

1. За формулами (3.2), (3.3) розраховуємо безрозмірні величини

$$n_1 = \frac{35}{70} = 0,5; \quad n_2 = \frac{600}{70} = 9.$$

2. За значеннями безрозмірних величин n_1 і n_2 та в залежності від форм рельєфу, перерізи яких представлені на рис. 3.1., за таблицею 3.1 визначаємо, що коефіцієнт $\eta_m = 2$.

3. Відношення $\frac{|x_0|}{a_0} = \frac{200}{600} = 0,3$, тому за графіками (рис. 3.1), що відповідають різним формам рельєфу визначаємо, що функція $\varphi_1 = 0,82$.

4. Поправочний коефіцієнт на рельєф η визначається за формулою (3.1)

$$\eta = 1 + 0,82(2,0 - 1) = 1,8.$$

5. За формулою (1.6) визначаємо максимальну концентрацію двоокису сірки

$$C_M(\text{SO}_2) = \frac{200 \cdot 16 \cdot 1 \cdot 1,32 \cdot 1,02 \cdot 1,8}{45^2 \cdot \sqrt[3]{9,3 \cdot 100}} = 0,392 \text{ мг/м}^3.$$

6. За формулою (3.4) визначаємо відстань від джерела викиду, на якій приземна концентрація за НМУ має найбільше значення

$$x'_M = \frac{5-1}{4} \cdot 11,11 \cdot \frac{1,1}{\sqrt{1,8+0,2}} \cdot 45 = 302,461 \text{ м} \approx 388,93 \text{ м}.$$

7. Визначаємо праву частину формули (3.5)

$$6,2x_M \sqrt{\eta-1} = 6,2 \cdot 500 \cdot \sqrt{1,8-1} = 2772,72 \text{ м} \approx 2773 \text{ м}.$$

Отже, у розрахунках приземних концентрацій по осі факела на різних відстанях від джерела, що здійснюється за формулою $C = S_1 \cdot C_M$, відношення x/x_M визначається з використанням x_M . Для значень $x \leq 2400$ м при обчисленні відношення x/x_M використовується значення $x_M = x_M^{(0)}$.

8. За формулами (2.15), (2.16) визначаємо коефіцієнт S_1 для відстані x

$$x = 50 \text{ м}, \quad x/x_M = 0,129 \quad S_1 = 3 \cdot (0,129)^4 - 8 \cdot (0,129)^3 + 6 \cdot (0,129)^2 = 0,084;$$

$$x = 100 \text{ м}, \quad x/x_M = 0,257 \quad S_1 = 3 \cdot (0,257)^4 - 8 \cdot (0,257)^3 + 6 \cdot (0,257)^2 = 0,274;$$

$$x = 200 \text{ м}, \quad x/x_M = 0,514 \quad S_1 = 3 \cdot (0,514)^4 - 8 \cdot (0,514)^3 + 6 \cdot (0,514)^2 = 0,708;$$

$$x = 400 \text{ м}, \quad x/x_M = 1,028 \quad S_1 = \frac{1,13}{0,13 \cdot (1,028)^2 + 1} = 0,994;$$

$$x = 1000 \text{ м}, \quad x/x_M = 2,571 \quad S_1 = \frac{1,13}{0,13 \cdot (2,571)^2 + 1} = 0,608;$$

$$x = 3000 \text{ м}, \quad x/x_M = 6 \quad S_1 = \frac{1,13}{0,13 \cdot (6)^2 + 1} = 0,20.$$

9. Концентрацію двоокису сірки в атмосферному повітрі C_x уздовж осі факела викиду на різних відстанях x від джерела викиду визначаємо за формулою (2.14)

$$x = 50 \text{ м}, \quad C = 0,084 \cdot 0,392 = 0,033 \text{ мг/м}^3;$$

$$x = 100 \text{ м}, \quad C = 0,274 \cdot 0,392 = 0,107 \text{ мг/м}^3;$$

$$x = 200 \text{ м}, \quad C = 0,708 \cdot 0,392 = 0,277 \text{ мг/м}^3;$$

$$x = 400 \text{ м}, \quad C = 0,994 \cdot 0,392 = 0,389 \text{ мг/м}^3;$$

$$x = 1000 \text{ м}, \quad C = 0,608 \cdot 0,392 = 0,238 \text{ мг/м}^3;$$

$$x = 3000 \text{ м}, \quad C = 0,20 \cdot 0,392 = 0,078 \text{ мг/м}^3.$$

Практична робота № 4

Прогнозування рівня забруднення атмосферного повітря на промисловому майданчику з урахуванням впливу забудови

Вплив забудови (будівель і споруд) на забруднення повітря пов'язаний із зміною характеру повітряних потоків поблизу будівлі. При обтіканні окремих будівель і їх груп можуть утворюватися вітрові тіні (застійні зони) з близькою до нуля середньою швидкістю вітру і інтенсивним турбулентним перемішуванням [3, 4].

Врахування впливу забудови здійснюється для джерел середньої висоти, низьких і наземних джерел. Розрахунок забруднення повітря від високих джерел, як правило, здійснюється без врахування впливу забудови [1, 10].

Для кожного з джерел перед виконанням розрахунків з врахуванням забудови визначаються значення максимальної концентрації C_m , а також відстані x_m і небезпечній швидкості u_m , при яких досягається концентрація C_m за відсутності забудови.

Розрахунок забруднення повітря з врахуванням впливу забудови здійснюється у випадках, коли будівля віддалена від джерела на відстань меншу x_m , або коли джерело розташоване на будівлі або в зонах можливого утворення вітрових тіней. При цьому висота будівлі $H_{\text{буд}}$ має бути не менше 0,4 висоти джерела H ($H_{\text{буд}} \geq 0,4H$). Якщо будівля віддалена від джерела на відстань більше, ніж $0,5 x_m$, і основа джерела не розміщується в зоні можливого утворення вітрової тіні, то врахування впливу забудови здійснюється у випадках, коли висота будівлі перевищує 0,7 висот джерела ($H_{\text{буд}} > 0,7H$) [1].

Висота $H_{\text{буд}}$ визначається за формулою

$$H_{\text{буд}} = \frac{V_{\text{буд}}}{S_{\text{ф}}}, \quad (4.1)$$

де $V_{\text{буд}}$ - фактичний об'єм будівлі, $S_{\text{ф}}$ - фактична площа фундаменту.

Розрахунок рівня забруднення атмосферного повітря на промисловому майданчику проводиться у наступній послідовності:

1. Визначення розмірів вітрової тіні.

Для кожної будівлі при заданому напрямі вітру розрізняються три основні типи вітрових тіней (рис. 4.1).

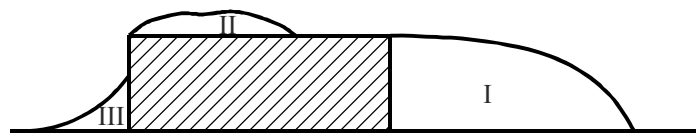


Рис. 4.1. Типи вітрових тіней:
I – підвітряна, II – на даху, III – навітряна (зона підпору)

Максимальні значення H_I , H_{II} , H_{III} висоти над рівнем землі вітрових тіней вказаних типів і їх довжина L_I , L_{II} , L_{III} визначаються за формулами:

$$H_I = H_{\text{буд}} , \quad L_I = 4 \cdot L^* , \quad (4.2)$$

$$\text{при } L_d \leq 2 \cdot L^* : H_{II} = H_{\text{буд}} + 0,4 \cdot L_d , \quad L_{II} = L_d , \quad (4.3)$$

$$\text{при } L_d > 2 \cdot L^* : H_{II} = H_{\text{буд}} + 0,4 \cdot L^* , \quad L_{II} = L^* , \quad (4.4)$$

$$H_{III} = 0,5 \cdot L^* , \quad L_{III} = L^* , \quad (4.5)$$

де

$$L^* = H_{\text{буд}} \text{ при } H_{\text{буд}} \leq L_{\text{ш}} , \quad (4.6)$$

$$L^* = L_{\text{ш}} \text{ при } H_{\text{буд}} > L_{\text{ш}} . \quad (4.7)$$

Розміри L_d і $L_{\text{ш}}$ встановлюються залежно від напрямку вітру. У випадках, коли вітер направлений по перпендикуляру до стіни будівлі, довжина цієї стіни приймається за $L_{\text{ш}}$, а довжина суміжної стіни - за L_d .

У тих випадках, коли джерело знаходиться в зонах, де утворення підвітряної тіні можливе лише при напрямі вітру, що відрізняється від напрямку нормалей до стін будівлі, максимальна приземна концентрація $\hat{c}_m$ досягається при небезпечному напрямі вітру, що відповідає перенесенню повітря до джерела від найближчого до нього кута будівлі. У цьому випадку через центр будівлі проводиться пряма, орієнтована уздовж напрямку вітру. Якщо ця пряма знаходиться усередині або на межі кута, який утворений діагоналями, що примикають до довшої сторони будівлі, то довжина цієї сторони приймається $L_{\text{ш}}$, а довжина суміжної сторони – L_d . В іншому випадку за $L_{\text{ш}}$ приймається коротша сторона будівлі, а за L_d – довша [1].

2. Визначення небезпечної швидкості вітру.

Небезпечна швидкість вітру за наявності будівлі u_m , м/с розраховується за формулами (2.1) – (2.6). При цьому, якщо висота джерела H менша висоти зони вітрової тіні H_b у точці розташування джерела, тобто $H < H_b$, то розрахунок вхідних у вказані формули значень v_m і f здійснюється при заміні висоти джерела H на висоту зони тіні H_b .

3. Визначення поправки, що враховує вплив забудови на розсіювання домішок в атмосфері

В залежності від відношення $\hat{u}_m / u_m$ визначається безрозмірний коефіцієнт r_3 , що описує вплив відмінності в небезпечних швидкостях вітру за наявності будівлі ($\hat{u}_m$) і при її відсутності (u_m), за формулами

$$\text{якщо } \frac{\hat{u}_m}{u_m} \leq 1 \quad r_3 = 0,67 \cdot \left(\frac{\hat{u}_m}{u_m} \right) + 1,67 \cdot \left(\frac{\hat{u}_m}{u_m} \right)^2 - 1,34 \cdot \left(\frac{\hat{u}_m}{u_m} \right)^3 , \quad (4.8)$$

$$\text{якщо } \frac{\hat{u}_m}{u_m} > 1 \quad r_3 = \frac{3 \cdot \hat{u}_m / u_m}{2 \cdot (\hat{u}_m / u_m)^2 - \hat{u}_m / u_m + 2} . \quad (4.9)$$

Якщо $H > H_b$, то $\hat{u}_m = u_m$ і $r_3 = 1$.

Коефіцієнт p_3 встановлюється в залежності від відношення $\hat{u}_M/u_M$ при $H < H_B$ за формулами:

$$\text{при } \frac{\hat{u}_M}{u_M} \leq 0,25 \quad p_3 = 3; \quad (4.10)$$

$$\text{при } 0,25 < \frac{\hat{u}_M}{u_M} \leq 1 \quad p_3 = 8,43 \cdot \left(1 - \frac{\hat{u}_M}{u_M}\right)^5 + 1; \quad (4.11)$$

$$\text{при } \frac{\hat{u}_M}{u_M} > 1 \quad p_3 = 0,32 \cdot \frac{\hat{u}_M}{u_M} + 0,68, \quad (4.12)$$

а при $H > H_B$ приймається $p_3 = 1$.

Коефіцієнт $\tilde{\eta}$ – зміна структури повітряного потоку за наявності забудови та за умови $H > H_B$ визначають за формулою

$$\tilde{\eta} = 1 + \frac{1}{1 + 16 \cdot (H/H_B - 1)^2} \quad (4.13)$$

залежно від відношення H/H_B . При $H < H_B$ приймається значення $\tilde{\eta}$, що відповідає $H = H_B$.

$$\text{Якщо } \tilde{\eta} < 1,4, \quad (4.14)$$

то в розрахунках приймається:

$$\hat{\eta}_M = 1, \quad \hat{c}_M = c_M, \quad \hat{u}_M = u_M, \quad \hat{x}_M = x_M.$$

Розраховуємо відношення

$$t_2 = \frac{L_{\text{ш}}}{L_{\text{д}}}. \quad (4.15)$$

В залежності від відношення t_2 знаходимо допоміжний кут φ_K (у градусах)

$$\text{якщо } t \leq 1 \quad \varphi_K = 136,5 \cdot t_2^4 - 364 \cdot t_2^3 + 273 \cdot t_2^2, \quad (4.16)$$

$$\text{якщо } t_2 > 1 \quad \varphi_K = 18 + \frac{28}{1 + 0,02 \cdot t_2^3}. \quad (4.17)$$

Визначаємо аргумент t_3 :

$$\text{при } \hat{u}_M \leq 5 \text{ м/с} \quad t_3 = \varphi_K \cdot \sqrt{\hat{u}_M}, \quad (4.18)$$

$$\text{при } \hat{u}_M > 5 \text{ м/с} \quad t_3 = 2,24 \cdot \varphi_K. \quad (4.19)$$

У тих випадках коли напрям вітру відрізняється від нормалі до стіни будівлі на кут γ , розраховують аргументи t_3' та t_3'' за формулами:

$$\text{при } \hat{u}_M \leq 5 \text{ м/с} \quad t_3' = (\varphi_K + \gamma) \cdot \sqrt{\hat{u}_M}, \quad (4.20)$$

$$\text{при } \hat{u}_M > 5 \text{ м/с} \quad t_3' = 2,24 \cdot (\varphi_K + \gamma). \quad (4.21)$$

$$\text{при } \hat{u}_M \leq 5 \text{ м/с} \quad t_3'' = (\varphi_K - \gamma) \cdot \sqrt{\hat{u}_M}, \quad (4.22)$$

$$\text{при } \hat{u}_M > 5 \text{ м/с} \quad t_3'' = 2,24 \cdot (\varphi_K - \gamma). \quad (4.23)$$

В залежності від аргументу t_3 визначаємо безрозмірний коефіцієнт впливу турбулентної дифузії усередині тіні і коливань напрямку вітру ζ_m за формулою

$$\zeta_m = 1 - \frac{1}{\left(1 + 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot t_3 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot t_3^2 + 9,2 \cdot 10^{-10} \cdot t_3^4\right)^4}. \quad (4.24)$$

Якщо напрям вітру відрізняється від нормалі до стіни будівлі, то за формулою (4.24) визначають $\zeta_m' = f(t_3')$ та $\zeta_m'' = f(t_3'')$, тоді $\zeta_m = \zeta_m' + \zeta_m''$.

Розраховуємо відношення

$$\xi = \frac{x_H}{p_3 \cdot x_m}. \quad (4.25)$$

Визначаємо безрозмірний коефіцієнт S_1 , що визначається в залежності від співвідношення x/x_m та коефіцієнта F .

При $H/H_b \geq 1$ приймається $S_1 = 1$. (4.26)

При $H/H_b < 1$ коефіцієнт S_1 визначається в залежності від ξ . Якщо $\xi \geq 1$, то коефіцієнт S_1 визначається за формулою (4.26), а при $\xi < 1$ коефіцієнт S_1 знаходиться за формулою (2.15).

Визначаємо значення аргументу t_1

$$t_1 = \frac{L_1 \cdot \sqrt{\tilde{\eta}}}{1,1 \cdot p_3 \cdot x_m}. \quad (4.27)$$

В залежності від значення аргументу t_1 визначаємо безрозмірний коефіцієнт s за формулами:

$$\text{якщо } 0 \leq t_1 < 1 \quad s = 0,6 \cdot t_1^4 - 2 \cdot t_1^3 + 2 \cdot t_1^2; \quad (4.28)$$

$$\text{якщо } 1 \leq t_1 \leq 8 \quad s = \frac{62,2}{64 + t_1^2} - \frac{0,357}{t_1}; \quad (4.29)$$

$$\begin{aligned} \text{якщо } 8 < t_1 \leq 50 \quad s = & \frac{t_1 \cdot (t_1 - 1) + 14,7}{t_1 \cdot [1,62 \cdot t_1 \cdot (t_1 - 1) + 2,09]} + \\ & + \frac{0,51 \cdot (t_1 - 4,92)^2}{t_1 \cdot (t_1 - 3,63)^2} + \frac{3,04}{t_1}; \end{aligned} \quad (4.30)$$

$$\text{якщо } t_1 > 50 \quad s = \frac{4,93}{t_1 + 10} \quad (4.31)$$

Визначаємо безрозмірний коефіцієнт ϑ_1 за формулою

$$\vartheta_1 = r_3 \cdot \tilde{\eta} \cdot s. \quad (4.32)$$

Якщо $\vartheta_1 \leq 1$, то в розрахунках приймається:

$$\hat{\eta}_m = 1, \quad \hat{c}_m = c_m, \quad \hat{u}_m = u_m, \quad \hat{x}_m = x_m.$$

Поправку, що враховує вплив забудови η_m визначаємо за формулою

$$\hat{\eta}_m = \vartheta_1 \cdot \zeta_m + s_1 \cdot (1 - \xi_m). \quad (4.33)$$

Для джерел, які розташовані поза зоною можливого утворення підвітряної тіні, небезпечний напрям вітру відповідає перенесенню повітря від будівлі до джерела по нормалі (рис 4.2,*а*), або у напрямку від найближчого рогу будівлі (рис 4.2,*б*). Якщо при цьому відстань від джерела до границі вітрової тіні x_B відповідає умові $x_B \leq 1,5L^*$, то формула (4.33) набуває вигляду

$$\hat{\eta}_M = (\vartheta_1 \cdot \zeta_M + s_1 \cdot (1 - \zeta_M)) \cdot (1 - a) + a, \quad (4.34)$$

де

$$a = \frac{1,5 \cdot x_B}{L^*} \quad (4.35)$$

При $x_B > 1,5L^*$ приймається $\hat{\eta}_M = 1$.

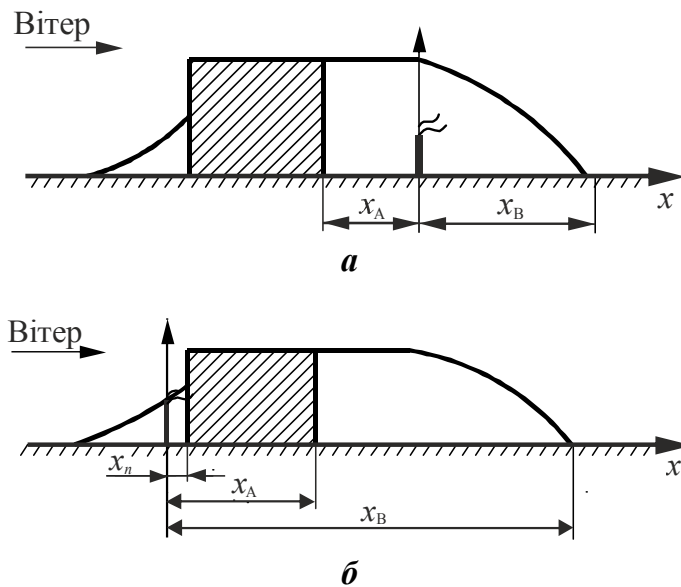


Рис. 4.2. Розрахункові схеми для випадків розташування джерела викиду:
а – у підвітряній зоні; *б* – у навітряній зоні

4. Розрахунок максимальної концентрації забруднюючої речовини та відстані до максимуму

Максимальне значення приземної концентрації c_M за наявності забудови визначається через максимальну концентрацію C_M , визначену без врахування впливу забудови, за формулою

$$\hat{c}_M = C_M \cdot \hat{\eta}_M, \quad (4.36)$$

де $\hat{\eta}_M$ – поправка, що враховує вплив забудови.

Концентрація $\hat{c}_M$ досягається на відстані x_M від джерела при небезпечній швидкості вітру $\hat{u}_M$ і небезпечному напрямі вітру.

Відстань $\hat{x}_M$ від джерела до точки, в якій досягається максимум приземної концентрації $\hat{c}_M$, у випадку $\xi \geq 1$ визначається за формулою

$$x_M = p_3 \cdot x_M, \quad (4.37)$$

а у випадку $\xi < 1$ за формулами

$$\text{при } H/H_B \leq 1 \quad \hat{x}_M = x_B; \quad (4.38)$$

$$\text{при } H/H_B > 1 \quad \hat{x}_M = \frac{1 + \zeta_M \cdot (\vartheta_1 \cdot \xi - 1)}{1 + \zeta_M \cdot (\vartheta_1 - 1)} \cdot x_M. \quad (4.39)$$

Для джерел, які розташовані поза зоною можливого утворення підвітряної тіні, формула (4.37) набуває вигляду

$$\hat{x}_M = (p_3 + a - a \cdot p_3) \cdot x_M, \quad (4.40)$$

а формули (4.38), (4.39) відповідно

$$\hat{x}_M = x_B + a \cdot (x_M - x_B) \quad (4.41)$$

$$\hat{x}_M = \left(\frac{1 + \zeta_M \cdot (\vartheta_1 \cdot \xi - 1)}{1 + \zeta_M \cdot (\vartheta_1 - 1)} \cdot x_M \right) \cdot (1 - a) + a \cdot x_M \quad (4.42)$$

Приклад 4. Визначити концентрацію шкідливих речовин в атмосферному повітрі в районі джерела їх викиду при несприятливих метеорологічних умовах. Речовини викидаються з димової труби котельної, що знаходиться на промисловому майданчику в м. Миколаїв.

Джерело викидів забруднюючих речовин у атмосферне повітря має слідуючі характеристики:

висота димової труби $H = 45$ м,

діаметр димової труби $D = 1,3$ м;

швидкість виходу газоповітряної суміші $w_0 = 7$ м/с,

температура газоповітряної суміші $T_r = 127$ °С.

З труби викидаються: ангідрид сірчистий $M_{SO_2} = 16$ г/с.

Труба котельні розміщена поблизу будівлі біля середини її довшої стіни. Висота будівлі $H_{буд} = 26$ м, ширина будівлі $L'_{ш} = 30$ м, довжина будівлі $L'_д = 60$ м.

Метеорологічні характеристики і коефіцієнти, які визначають умови розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі:

Коефіцієнт температурної стратифікації атмосфери $A = 200$

Коефіцієнт рельєфу місцевості $\eta = 1$

Середня максимальна температура зовнішнього повітря найжаркішого місяця року $- 27$ °С, а найхолоднішого місяця $- -7$ °С

Швидкість вітру (N) (за середніми багаторічними даними), повторення перевищення якої складає 5 % $- 11$ м/с.

Небезпечний напрямок вітру $-$ перпендикулярно довшій стіні будівлі, від будівлі до джерела.

Для ангідриду сірчистого: $C_M^{SO_2} = 0,22$ мг/м³, $x_M^{SO_2} = 500$ м, $u_M = 1,9$ м/с.

Максимальні разові гранично допустимі концентрації (ГДК) ангідриду сірчистого $- 0,5$ мг/м³, золи $- 0,5$ мг/м³.

Розв'язок:

Визначення поправки, що враховує вплив забудови на розсіювання домішок в атмосфері

1. Оскільки небезпечний напрямок вітру спрямований від будівлі до джерела перпендикулярно довшій стіні будівлі, то приймаємо $L_d = L'_ш = 30$ м; $L_ш = L'_d = 60$ м.

2. Оскільки $H_{б\text{уд}} \leq L_ш$, то $L^* = H_{б\text{уд}} = 26$ м.

3. Довжина підвітряної тіні визначається за формулою (4.2)

$$L_I = 4 L^* = 4 \cdot 26 = 104 \text{ м.}$$

4. За формулою (4.2) визначаємо висоту вітрової тіні в точці розміщення джерела $H_v = H_{б\text{уд}} = 26$ м.

$$\text{Відношення } \frac{H}{H_v} = \frac{45}{26} = 1,73.$$

5. Оскільки висота джерела викиду H більша за висоту вітрової тіні в точці розміщення джерела H_v , то небезпечна швидкість вітру за наявності будівлі буде дорівнювати небезпечній швидкості вітру при відсутності будівлі $u_m = u_m$ і коефіцієнти, що описують вплив відмінності в небезпечних швидкостях вітру за наявності будівлі (u_m) і при її відсутності (u_m), приймаються: $r_3 = 1, p_3 = 1$.

6. За формулою (4.13) визначаємо коефіцієнт зміни структури повітряного потоку при наявності забудови

$$\tilde{\eta} = 1 + \frac{1}{1 + 16 \cdot \left(\frac{45}{26 - 1} \right)^2} = 1,019.$$

7. За формулою (4.15) визначаємо відношення $t_2 = \frac{60}{30} = 2$.

8. Оскільки $t_2 > 1$, то допоміжний кут φ_k (у градусах) визначаємо за формулою (4.17)

$$\varphi_k = 18 + \frac{28}{1 + 0,02 \cdot 2^3} = 42^\circ.$$

9. Оскільки небезпечна швидкість вітру за наявності будівлі менша 5 м/с, то аргумент t_3 визначаємо за формулою (4.18)

$$t_3 = 42 \cdot \sqrt{1,9} = 57,89.$$

10. За формулою (4.24) визначаємо безрозмірний коефіцієнт коливань напрямку вітру

$$\zeta_m = 1 - \frac{1}{\left(1 + 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot 57,89 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 57,89^2 + 9,2 \cdot 10^{-10} \cdot 57,89^4 \right)^4} = 0,394.$$

11. Оскільки $H/H_b \geq 1$, то безрозмірний коефіцієнт впливу турбулентної дифузії в середині тіні приймаємо $s_1 = 1$.

12. За формулою (4.27) визначаємо аргумент t_1 :

$$t_1 = \frac{104 \cdot \sqrt{1,019}}{1,1 \cdot 1 \cdot 500} = 0,191$$

13. Оскільки виконується умова $0 \leq t_1 < 1$, то значення коефіцієнта S_1 розраховуємо за формулою (4.28)

$$s = 0,6 \cdot 0,191^4 - 2 \cdot 0,191^3 + 2 \cdot 0,191^2 = 0,06.$$

14. За формулою (4.32) визначаємо безрозмірний коефіцієнт

$$\vartheta_1 = 1 \cdot 1,019 \cdot 0,06 = 0,061.$$

15. Поправку, що враховує вплив забудови, визначаємо за формулою (4.33)

$$\eta_m = 0,061 \cdot 0,394 + 1 \cdot (1 - 0,394) = 0,63.$$

Розрахунок максимальної концентрації сірчистого ангідриду та відстані до максимуму з урахуванням впливу забудови

16. За наявності забудови максимальне значення приземної концентрації $\hat{c}_m$ визначається через максимальну концентрацію C_m , визначену без врахування впливу забудови за формулою (4.36)

$$\hat{c}_m = 0,22 \cdot 0,63 = 0,139 \text{ мг/м}^3.$$

17. Визначаємо значення безрозмірної величини ξ , що розраховується за формулою (4.25)

$$\xi = \frac{104}{1 \cdot 500} = 0,208.$$

18. Оскільки $\xi < 1$, а також $H/H_b > 1$, то відстань $\hat{x}_m$ від джерела викиду до точки, в якій досягається максимум приземної концентрації $\hat{c}_m$, визначається за формулою (4.39)

$$\hat{x}_m = \frac{1 + 0,394 \cdot (0,061 \cdot 0,208 - 1)}{1 + 0,394 \cdot (1,98 - 1)} \cdot 500 = 219,7 \text{ м.}$$

Практична робота № 5

Розрахунок осової концентрації забруднюючої речовини на різних відстанях з урахуванням впливу забудови

Розрахунок розподілу концентрації від точкового джерела з врахуванням впливу забудови при заданій швидкості і напрямі вітру виконується для обмежених ділянок промайданчика при вирішенні окремих питань, таких, як розміщення повітрозаборів, а також як складова частина розрахунку забруднення повітря на промайданчику від декількох джерел [4].

До проведення розрахунків на плані місцевості через джерело проводиться пряма лінія, орієнтована уздовж вітру. Якщо ця лінія не перетинає основу будівлі, то розрахунок розподілу приземних концентрацій проводиться без врахування впливу будівлі. У разі перетину будівлі лінією на плані враховується вплив забудови. При цьому визначається довжина підвітряної сторони будівлі.

Розрахунок рівня забруднення атмосферного повітря на промисловому майданчику проводиться у наступній послідовності:

1. Визначення значень коефіцієнтів

Знаходимо безрозмірний коефіцієнт впливу турбулентної дифузії усередині тіні і коливань напрямку вітру ζ (формула 4.24) для значень швидкості вітру u , що відрізняється від небезпечної. При його визначенні спочатку розраховують значення t_3 за формулою (4.20) – (4.23), до якої замість $\hat{u}_m$ підставляють значення u . Отримані величини підставляють у формулу (4.24).

Коефіцієнт s_1 знаходиться в залежності від відношення $x/(p \cdot x_m)$. Тут безрозмірний коефіцієнт p визначається в залежності від відношення u/u_m за формулами (2.15) – (2.18).

Коефіцієнт s_2 знаходиться за формулою (2.22).

Для відповідних значень швидкості u визначаються величини $\tilde{\eta}$, s і r_3 за формулами (4.33, 4.8, 4.9, 4.13), і за формулою (4.32) обчислюється коефіцієнт ϑ_1 . Якщо $\vartheta_1 < 1$, то приймається $\vartheta_1 = 1$.

Коефіцієнт $\tilde{s}_2$ при $x \leq x_b$ (тобто всередині зони підвітряної тіні (рис. 4.2,а) обчислюється за формулами

$$\text{якщо } -L^*/2 \leq y \leq L^*/2 \quad \tilde{s}_2 = 1, \quad (5.1)$$

$$\text{якщо } |y| > L^*/2 \quad \tilde{s}_2 = 0. \quad (5.2)$$

При $x > x_b$ коефіцієнт $\tilde{s}_2$ знаходиться за формулою (2.22), як значення s_2 , що відповідає аргументу:

$$\text{якщо } u \leq 5 \text{ м/с} \quad t_y = \frac{u \cdot y^2}{\left(x - x_b + 2,24 \cdot L^* \cdot \sqrt{u}\right)^2}, \quad (5.3)$$

$$\text{якщо } u \leq 5 \text{ м/с} \quad t_y = \frac{5 \cdot y^2}{\left(x - x_b + 5 \cdot L^*\right)^2}. \quad (5.4)$$

Знаходимо параметр L' за формулами

$$\text{якщо } x_B + 5 \cdot H_B \leq p \cdot x_M \quad L' = p \cdot x_M, \quad (5.5)$$

$$\text{якщо } x_B + 5 \cdot H_B > p \cdot x_M \quad L' = x_B + 5 \cdot H_B. \quad (5.6)$$

Коефіцієнт s' знаходиться за формулами:

– у випадку розміщення джерела в зоні підвітряної тіні

$$\text{при } x < x_B \quad s' = \vartheta_1 \cdot \bar{s}_2, \quad (5.7)$$

$$\text{при } x_B < x \leq L' \quad s' = \vartheta_1 \cdot \bar{s}_2 \cdot (1 - s'') + s'_1 \cdot s_2 \cdot s'', \quad (5.8)$$

$$\text{при } x > L' \quad s' = s_1 \cdot s_2. \quad (5.9)$$

Тут s'_1 – коефіцієнт s_1 обчислений при значенні $x = L'$.

– у випадку розміщення джерела в зоні підпору спочатку знаходять значення параметра p_3 за формулами

$$\text{при } s \cdot \tilde{\eta} \leq 1 \quad p_3 = 1, \quad (5.10)$$

$$\text{при } 1 < s \cdot \tilde{\eta} < 4,35 \quad p_3 = 1 + 8,43 \cdot \left(0,965 - \frac{0,875}{s \cdot \tilde{\eta}} - \frac{0,08}{s^2 \cdot \tilde{\eta}^2} \right), \quad (5.11)$$

$$\text{при } s \cdot \tilde{\eta} > 4,35 \quad p_3 = 3. \quad (5.12)$$

Тут коефіцієнт s визначають за формулами (4.28) – (4.31), в залежності від відношення t_1 , що розраховують за формулою (4.27) із заміною L_I на L_{III} , де L_{III} – довжина навітряної зони вітрової тіні.

За координатами кінця будівлі відносно джерела x_K та підвітряного краю підвітряної тіні відносно джерела x_B (рис. 4.2, *a*) визначають параметри t_{1B} і t_{1K} за формулою (4.27) при заміні L_I на x_B і x_K відповідно. Далі за t_{1B} і t_{1K} визначають коефіцієнти s_B і s_K розраховують як значення s за формулами (2.15)–(2.18).

$$\text{Потім розраховують параметр } \tilde{s} \text{ за формулою } \tilde{s} = \frac{x_B s_B - x_K s_K}{x_B - x_K}. \quad (5.13)$$

Знаходять за формулою (4.32) параметр $\tilde{\vartheta}_1$ із заміною s на $\tilde{s}$, і визначають s'

$$\text{при } x < x_H \quad s' = \vartheta_1 \cdot \tilde{s}_2, \quad (5.14)$$

$$\text{при } x_H < x \leq x_B \quad s' = \tilde{\vartheta}_1 \cdot \tilde{s}_2, \quad (5.15)$$

$$\text{при } x_B < x \leq L' \quad s' = \tilde{\vartheta}_1 \cdot \tilde{s}_2 \cdot (1 - s'') + s_1 \cdot s_2 \cdot s'', \quad (5.16)$$

$$\text{при } x > L' \quad s' = s_1 \cdot s_2, \quad (5.17)$$

Коефіцієнт s'' знаходиться за формулами

$$\text{при } x_B + 5 \cdot H_B \leq p \cdot x_M \quad s'' = \frac{2 \cdot (x - x_B)}{p \cdot x_M + x - 2 \cdot x_B}, \quad (5.18)$$

$$\text{при } x_B + 5 \cdot H_B > p \cdot x_M \quad s'' = \frac{x - x_B}{2 \cdot H_B + 0,6 \cdot (x - x_B)}. \quad (5.19)$$

2. Визначення поправки, що враховує вплив забудови на розсіювання домішок в атмосфері

Значення η у точці, розташованій на відстані x від джерела уздовж осі факела і на відстані y від цієї осі, визначається за формулою

$$\eta = (1 - \zeta) \cdot s_1 \cdot s_2 + \zeta \cdot s' . \quad (5.20)$$

3. Розрахунок розподілу концентрації забруднюючої речовини

Приземна концентрація при довільних значеннях швидкості і напрямку вітру розраховується за формулою

$$\tilde{C} = C_M \cdot r \cdot \eta , \quad (5.21)$$

де концентрація C_M розраховується за формулою (1.6), а коефіцієнт r визначається у залежності від відношення $u/\hat{u}_M$ за формулами (2.8), (2.9). Небезпечна швидкість вітру $\hat{u}_M$ з врахуванням впливу забудови визначається у відповідності до розділу 4.

Приклад 5. За умови прикладу 4 визначити розподіл концентрації шкідливих речовин в атмосферному повітрі від точкового джерела з врахуванням впливу забудови для відстаней по осі факела $x = 50, 100, 200, 400, 1000, 3000$ м.

Розв'язок:

1. Оскільки джерело розміщене у зоні підвітряної тіні, то значення коефіцієнта ζ , що залежить від швидкості вітру u і позитивного гострого кута γ між напрямом вітру і нормаллю до підвітряної стіни будівлі, визначається за формулою (4.24), що і ζ_M , причому значення t_3 визначають за формулою (4.18) із заміною $\hat{u}_M$ на u . При цьому, як і раніше, ϕ_k визначається за формулами (4.16), (4.17). Отже, $\zeta = \zeta_M = 0,394$.

2. Визначаємо безрозмірний коефіцієнт S_2 на осі факела.

Оскільки небезпечна швидкість вітру $u \leq 5$ м/с, а також $y = 0$, то $t_y = 0$, відповідно $S_2 = 1$.

3. Оскільки виконується умова $-L^*/2 \leq y \leq L^*/2$, то значення коефіцієнта $\tilde{s}_2$ при $x_x \leq x_b$, тобто всередині зони підвітряної тіні (рис. 4.2,б) обчислюється за формулою (5.1)

$$\tilde{s}_2 = 1.$$

4. Оскільки виконується умова $x_b + 5 \cdot H_b \leq p \cdot x_M$, (формула 5.5) $104 + 5 \cdot 26 \leq 1 \cdot 500$, то величина $L' = p \cdot x_M = 1 \cdot 500 = 500$.

5. Визначаємо безрозмірний коефіцієнт S_1 в залежності від співвідношення x/x_M та коефіцієнта F

Коефіцієнт S_1 для відстані x :

$$\begin{aligned} x = 50 \text{ м, } x/x_M = 0,1 & S_1 = 3 \cdot (0,1)^4 - 8 \cdot (0,1)^3 + 6 \cdot (0,1)^2 = 0,052; \\ x = 100 \text{ м, } x/x_M = 0,2 & S_1 = 3 \cdot (0,2)^4 - 8 \cdot (0,2)^3 + 6 \cdot (0,2)^2 = 0,176; \\ x = 200 \text{ м, } x/x_M = 0,4 & S_1 = 3 \cdot (0,4)^4 - 8 \cdot (0,4)^3 + 6 \cdot (0,4)^2 = 0,525; \\ x = 400 \text{ м, } x/x_M = 0,8 & S_1 = 3 \cdot (0,8)^4 - 8 \cdot (0,8)^3 + 6 \cdot (0,8)^2 = 0,973; \\ x = 1000 \text{ м, } x/x_M = 2 & S_1 = \frac{1,13}{0,13 \cdot (2)^2 + 1} = 0,743; \\ x = 3000 \text{ м, } x/x_M = 6 & S_1 = \frac{1,13}{0,13 \cdot (6)^2 + 1} = 0,199. \end{aligned}$$

6. Оскільки виконується умова $x_B + 5 \cdot H_B \leq p \cdot x_M$, $104 + 5 \cdot 26 \leq 1 \cdot 500$, то коефіцієнт S'' для відстані x визначається за формулою (5.15)

$$\begin{aligned} x = 200 \text{ м, } s'' &= \frac{2 \cdot (200 - 104)}{1 \cdot 500 + 200 - 2 \cdot 104} = 0,39; \\ x = 400 \text{ м, } s'' &= \frac{2 \cdot (400 - 104)}{1 \cdot 500 + 400 - 2 \cdot 104} = 0,86. \end{aligned}$$

7. Визначаємо коефіцієнт S' для відстані x :

- оскільки $x < x_g$, то коефіцієнт S' визначаємо за формулою (5.7)

$$\begin{aligned} x = 50 \text{ м, } s' &= 0,061 \cdot 1 = 0,061, \\ x = 100 \text{ м, } s' &= 0,061 \cdot 1 = 0,061; \end{aligned}$$

- оскільки $x_g < x \leq L'$, то коефіцієнт S' визначаємо за формулою (5.8)

$$\begin{aligned} x = 200 \text{ м, } s' &= 0,061 \cdot 1 \cdot (1 - 0,39) + 1 \cdot 1 \cdot 0,39 = 0,43, \\ x = 400 \text{ м, } s' &= 0,061 \cdot 1 \cdot (1 - 0,86) + 1 \cdot 1 \cdot 0,86 = 0,87; \end{aligned}$$

- оскільки $x > L'$, то коефіцієнт S' визначаємо за формулою (5.9)

$$x = 1000 \text{ м, } s' = 0,664 \cdot 1 = 0,664.$$

8. Поправочний коефіцієнт впливу забудови $\hat{\eta}$ у точці, розташованій на відстані x від джерела уздовж осі факела і на відстані y від цієї осі при розміщенні джерела в зоні підвітряної тіні, визначається за формулою (5.17):

$$\begin{aligned} \text{при } x = 50 \text{ м, } \hat{\eta} &= (1 - 0,394) \cdot 0,052 \cdot 1 + 0,394 \cdot 0,061 = 0,056; \\ \text{при } x = 100 \text{ м, } \hat{\eta} &= (1 - 0,394) \cdot 0,176 \cdot 1 + 0,394 \cdot 0,061 = 0,131; \\ \text{при } x = 200 \text{ м, } \hat{\eta} &= (1 - 0,394) \cdot 0,525 \cdot 1 + 0,394 \cdot 0,43 = 0,488; \\ \text{при } x = 400 \text{ м, } \hat{\eta} &= (1 - 0,394) \cdot 0,973 \cdot 1 + 0,394 \cdot 0,87 = 0,932; \\ \text{при } x = 1000 \text{ м, } \hat{\eta} &= (1 - 0,394) \cdot 0,743 \cdot 1 + 0,394 \cdot 0,664 = 0,712. \end{aligned}$$

9. За формулою (5.18) визначаємо приземну концентрацію $\tilde{C}$ на відстані x від джерела уздовж осі факела: $\tilde{C} = C_M \cdot r \cdot \hat{\eta}$

при $x = 50$ м, $\tilde{C} = 0,22 \cdot 1 \cdot 0,056 = 0,012$ мг/м³;
 при $x = 100$ м, $\tilde{C} = 0,22 \cdot 1 \cdot 0,131 = 0,029$ мг/м³;
 при $x = 200$ м, $\tilde{C} = 0,22 \cdot 1 \cdot 0,488 = 0,107$ мг/м³;
 при $x = 400$ м, $\tilde{C} = 0,22 \cdot 1 \cdot 0,932 = 0,205$ мг/м³;
 при $x = 1000$ м, $\tilde{C} = 0,22 \cdot 1 \cdot 0,712 = 0,157$ мг/м³.

Практична робота № 6

Прогнозування рівня забруднення атмосферного повітря на ділянці магістральної траси

Особливістю розрахунку рівня забруднення атмосферного повітря на ділянці магістральної траси є пересувний характер джерел забруднення атмосфери. У процесі руху автомобільного транспорту до атмосфери викидаються оксид вуглецю, діоксид вуглецю, оксиди сірки та азоту, сполуки свинцю, сажа, вуглеводні, зокрема канцерогенний бенз(а)пірен C₂₀H₁₂, а також парникові гази (діоксид вуглецю). При застосуванні етильованого бензину можливе також забруднення атмосфери сполуками свинцю.

Кількість i -ої шкідливої речовини M_i (г/с), що утворюється при згорянні одиниці палива, може бути розрахована за формулою [15]:

$$M_i = k_i \cdot G \quad (6.1)$$

де k_i – безрозмірний коефіцієнт викиду речовин з вихлопними газами для двигунів при спалюванні 1 кг (л) палива (таблиця 6.1); G – сумарна кількість використаного палива, г/с [12].

Таблиця 6.1. Коефіцієнт викиду речовин з вихлопними газами для двигунів при спалюванні 1 кг (л) палива

Вид палива	Оксид вуглецю CO	Вуглеводні CH	Оксид азоту NO	Свинець Pb
Бензин	0,6	0,1	0,04	0,002
Дизельне	0,1	0,03	0,04	0,0012
Газ	0,3	0,025	0,038	0,0000

У моделі забруднення автомагістраль розглядається як лінійне стаціонарне наземне джерело викиду шкідливих речовин [3].

Середню кількість машин N , що знаходяться на ділянці автомагістралі визначають за формулою:

$$N = \frac{l \cdot n_{\text{к.п.}}}{60 \cdot w}, \quad (6.2)$$

де l – довжина ділянки магістралі, м; $n_{\text{к.п.}}$ – кількість машин, що пройшли через контрольний пункт на ділянці в обидві сторони за 1 хв.; w – середня швидкість автомобілів, м/с [12].

Якщо прийняти, що в середньому легкові і вантажні автомобілі витрачають на 1 км дороги кількість палива γ , то за одну секунду витрата палива однієї машини буде складати

$$g = \frac{\gamma \cdot w}{1000}, \quad (6.3)$$

а загальна витрата палива G всіх машин на даній ділянці магістралі

$$G = \frac{\gamma \cdot l \cdot n_{\text{к.п.}}}{6 \cdot 10^4}. \quad (6.4)$$

З достатньою для практичних розрахунків точністю середнє значення γ може бути прийнято, як 100 г/км, тоді формула прийме вигляд

$$G = \frac{l \cdot n_{\text{к.п.}}}{600}. \quad (6.5)$$

При здійсненні розрахунків концентрації C_i шкідливої речовини у контрольній точці для наземного лінійного джерела забруднення приймають наступні припущення. Атмосфера перебуває у стані штилю, тому швидкість вітру u у напрямку до житлового масиву дорівнює 0,5 м/с. Узагальнений коефіцієнт дифузії S , який визначає поширення домішок внаслідок турбулентності потоку приймають у межах 0,05 ÷ 0,5 (небезпечне значення узагальненого коефіцієнта дифузії $S_{\text{н}} = 0,12$).

Визначення концентрації шкідливої речовини проводиться у наступній послідовності.

Знаходимо значення безрозмірних координат μ і ν , що характеризують зсув контрольної точки відносно центру джерела забруднень:

$$\mu_1 = \frac{2 \cdot S_{\text{н}} \cdot \Delta x}{l}, \quad \nu_1 = \frac{2 \cdot \Delta y}{l}; \quad (6.6)$$

$$\mu_2 = \frac{2 \cdot S_{\text{н}} \cdot \Delta x}{H}, \quad \nu_2 = \frac{Z}{H}; \quad (6.7)$$

$$\mu_3 = \frac{0,9 \cdot S_{\text{н}} \cdot \Delta x}{\frac{l}{2} + H}, \quad \nu_3 = \frac{\Delta y}{\frac{l}{2} + H}; \quad (6.8)$$

$$\mu_4 = \frac{0,9 \cdot S_{\text{н}} \cdot \Delta x}{2 \cdot H}, \quad \nu_4 = \frac{Z}{2 \cdot H}, \quad (6.9)$$

де Δx – відстань від осі магістралі до контрольної точки у напрямі перпендикулярному осі; Δy – відстань від центру ділянки магістралі до контрольної точки у напрямі, паралельному її осі [12].

Потім по номограмах (рис. 6.1) по відповідних парах μ і ν знаходимо значення $\Psi_1 - \Psi_4$.

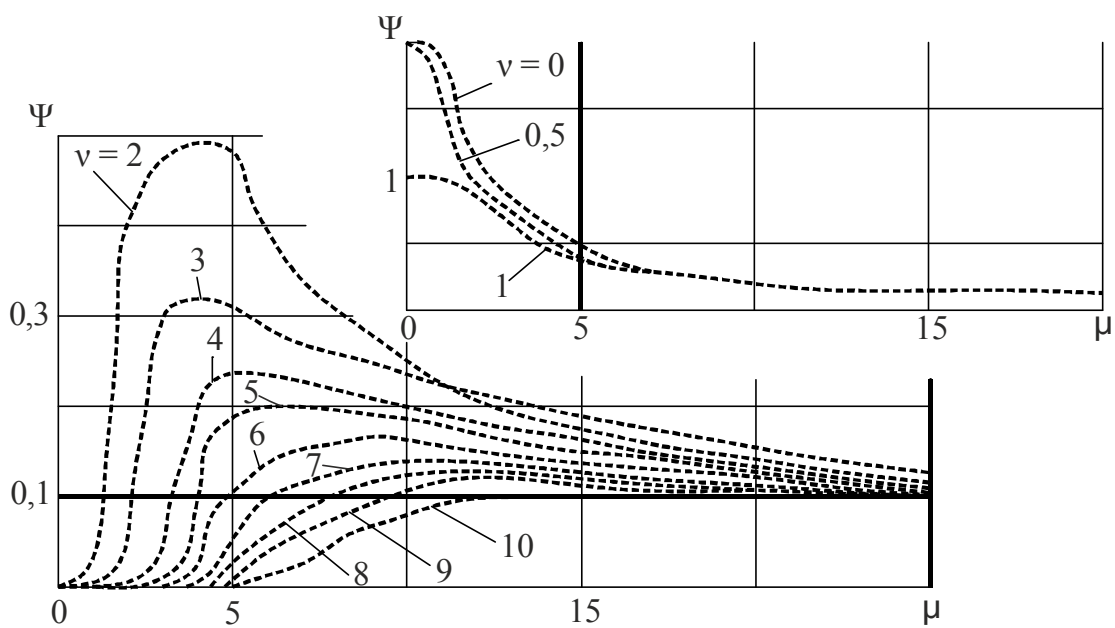


Рис. 6.1. Графіки для визначення функції Ψ

Далі розраховуємо безрозмірні параметри a і b за формулами:

$$a = \Psi_1 \cdot \Psi_2, \quad b = \Psi_3 \cdot \Psi_4. \quad (6.10)$$

Згідно з якими за номограмами (рис 6.2) визначаємо значення функції ϕ , що характеризує взаємне розташування джерела і точки, в якій оцінюється забруднення атмосфери.

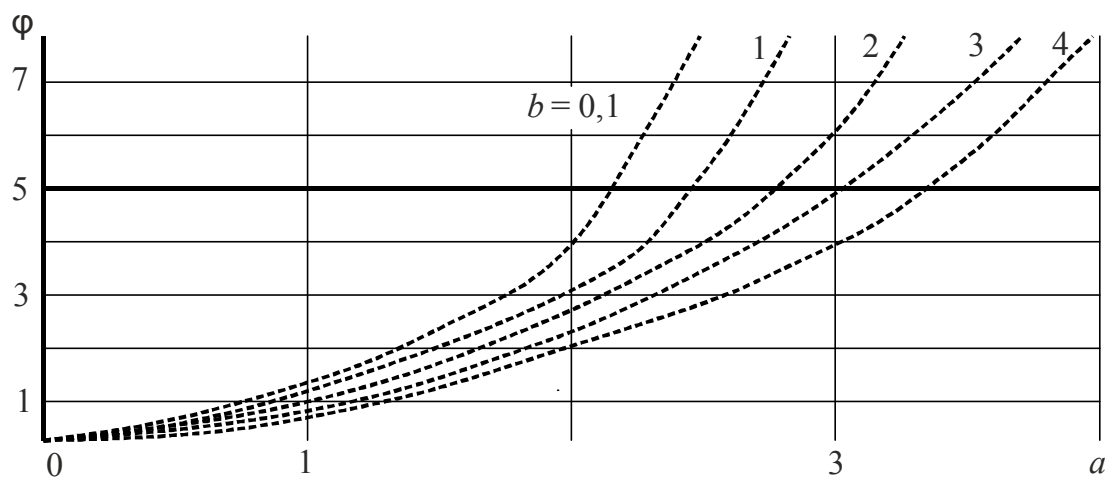


Рис. 6.2. Графіки для визначення функції ϕ

Знаходимо умовну концентрацію шкідливої речовини $C_i^{ум}$ за формулою

$$C_i^{ум} = \frac{M_i}{8 \cdot l \cdot H \cdot u}, \quad (6.11)$$

де H – висота джерела забруднення над поверхнею землі, м.

Тоді концентрація шкідливої речовини розраховується за формулою [15]

$$C = C_i^{ym} \cdot \varphi. \quad (6.12)$$

Приклад 6.1. Оцінити рівень забруднення атмосфери вихлопними газами автомобілів у житловому масиві, що розміщений біля автомагістралі.

Вихідні дані: довжина ділянки автомагістралі $l = 1000$ м; середня кількість автомашин, що проходять у обох напрямках за хвилину $n_{к.п} = 60$ шт/хв; частка автомобілів з бензиновими двигунами в загальній кількості – 100 %; координати контрольних точок відносно середини ділянки автомагістралі $\Delta x = 50$ м, $\Delta y = 150$ м, $z = 2$ м. Висота джерела забруднення H (розташування вихлопних труб автомобілів над полотном дороги) приймається рівною 0,5 м.

Розрахунок ведеться для найбільш несприятливого напрямку вітру від джерела забруднення у бік житлового масиву.

Розв'язок

За формулою (6.6) розраховуємо кількість палива G , що спалюється всіма автомашинами за одиницю часу:

$$G = \frac{1000 \cdot 60}{600} = 100 \text{ г/с}.$$

Враховуючи коефіцієнти викиду речовин з вихлопними газами для двигунів при спалюванні 1 кг (л) палива з таблиці 6.1 за формулою (6.1) визначаємо секундні викиди шкідливих речовин

$$M_{CO} = 0,6 \cdot 100 = 60 \text{ г/с},$$

$$M_{CH} = 0,1 \cdot 100 = 10 \text{ г/с},$$

$$M_{NO} = 0,04 \cdot 100 = 4 \text{ г/с},$$

$$M_{Pb} = 0,002 \cdot 100 = 0,2 \text{ г/с}.$$

За формулами (6.6) – (6.9) обчислюємо безрозмірні координати $\mu_1 - \mu_4$ і $v_1 - v_4$, що характеризують зсув контрольної точки відносно центру джерела забруднення:

$$\mu_1 = \frac{2 \cdot 0,12 \cdot 50}{1000} = 0,012, \quad v_1 = \frac{2 \cdot 150}{1000} = 0,3;$$

$$\mu_2 = \frac{2 \cdot 0,12 \cdot 50}{0,5} = 24, \quad v_2 = \frac{2}{0,5} = 4;$$

$$\mu_3 = \frac{0,9 \cdot 0,12 \cdot 50}{\frac{1000}{2} + 0,5} = 0,12, \quad v_3 = \frac{150}{\frac{1000}{2} + 0,5} = 0,3;$$

$$\mu_4 = \frac{0,9 \cdot 0,12 \cdot 50}{2 \cdot 0,5} = 5,4, \quad v_4 = \frac{2}{2 \cdot 0,5} = 2.$$

Для обчислених пар параметрів μ і v , за графіками (рис. 6.1) визначаємо відповідні значення функції Ψ ($\Psi_1 - \Psi_4$). Отже $\Psi_1 = 2$; $\Psi_2 = 0,13$; $\Psi_3 = 1,9$; $\Psi_4 = 0,44$.

За формулами (6.10) розраховуємо безрозмірні параметри a і b :

$$a = 2 \cdot 0,13 = 0,26; \quad b = 1,9 \cdot 0,44 = 0,84.$$

По розрахованих значеннях a і b за номограмою (рис 6.2) визначаємо, що значення функції $\varphi = 0,2$.

Для кожної шкідливої речовини за формулою (6.11) визначаємо умовну концентрацію $C_i^{\text{ум}}$:

$$C_{\text{CO}}^{\text{ум}} = \frac{60}{8 \cdot 1000 \cdot 0,5 \cdot 0,5} = 0,03 \text{ мг/м}^3;$$

$$C_{\text{CH}}^{\text{ум}} = \frac{10}{8 \cdot 1000 \cdot 0,5 \cdot 0,5} = 0,005 \text{ мг/м}^3;$$

$$C_{\text{NO}}^{\text{ум}} = \frac{4}{8 \cdot 1000 \cdot 0,5 \cdot 0,5} = 0,002 \text{ мг/м}^3;$$

$$C_{\text{Pb}}^{\text{ум}} = \frac{0,2}{8 \cdot 1000 \cdot 0,5 \cdot 0,5} = 0,0001 \text{ мг/м}^3.$$

За формулою (6.12) визначаємо абсолютні концентрації шкідливих речовин у контрольній точці, а також їх приведені концентрації:

$$C_{\text{CO}} = 0,03 \cdot 0,2 = 0,006 \text{ мг/м}^3, \quad \frac{C_{\text{CO}}}{\text{ГДК}_{\text{CO}}} = \frac{0,006}{3} = 0,002;$$

$$C_{\text{CH}} = 0,005 \cdot 0,2 = 0,001 \text{ мг/м}^3, \quad \frac{C_{\text{CH}}}{\text{ГДК}_{\text{CH}}} = \frac{0,001}{1} = 0,001;$$

$$C_{\text{NO}} = 0,002 \cdot 0,2 = 0,0005 \text{ мг/м}^3, \quad \frac{C_{\text{NO}}}{\text{ГДК}_{\text{NO}}} = \frac{0,0005}{0,06} = 0,008;$$

$$C_{\text{Pb}} = 0,0001 \cdot 0,2 = 0,00002 \text{ мг/м}^3, \quad \frac{C_{\text{Pb}}}{\text{ГДК}_{\text{Pb}}} = \frac{0,00002}{0,0003} = 0,067.$$

У вітчизняній практиці набув застосування також метод оцінки рівня забруднення атмосферного повітря вихлопними газами автотранспорту на ділянці магістральної траси за концентрацією оксиду вуглецю, як речовини, токсичний вплив якої найбільш вивчений.

Комплексна оцінка забруднення атмосфери при цьому здійснюється за допомогою коефіцієнта приведення різних забруднюючих речовин до СО за формулою [14]

$$\sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n k_{\text{при}i} \cdot C_{\text{CO}}, \quad (6.13)$$

де $k_{\text{при}i}$ – коефіцієнт приведення концентрації i -го забруднювача до концентрації СО, як найбільш вивченої домішки (таблиця 6.2)

Таблиця 6.2. Значення коефіцієнтів приведення концентрації *i*-го забруднювача до концентрації СО, для основних шкідливих речовин, що містяться у викидах автотранспорту

Шкідлива речовина	$k_{при}$
Оксид вуглецю, СО	1,0
Сірчистий ангідрид, SO ₂	22,0
Оксиди азоту в перерахунку за масою на NO ₂	41,1
Леткі низькомолекулярні вуглеводні, C _m H _m (пара рідких палив за вуглецем)	3,16
3,4 бенз(а)пірен	1260000
Формальдегід	240
Акролеїн	294
Ацетальдегід	41,6
Сажа без домішок, С (пил вуглецю без урахування домішок)	41,5
Неорганічні сполуки свинцю (за Pb)	22400
Тверді частинки, що викидаються бензиновими двигунами, що живляться неетилованим бензином	300
Тверді частинки, що викидаються бензиновими двигунами, що живляться етилованим бензином	500
Тверді частинки, що викидаються дизелями і установками, які спалюють мазут і газ	200

В основу методу розрахунку концентрацій оксиду вуглецю покладено залежності, отримані в результаті аналізу двовимірної дифузійної моделі розсіювання легких аерозолів з урахуванням коригувального впливу зовнішніх чинників на величину концентрації. Для розрахунку концентрацій легких фракцій використовують метод, що дозволяє враховувати нелінійний характер зміни основних параметрів екосистеми.

Нелінійний характер зміни параметрів враховується введенням поправочних коефіцієнтів: K_a – коефіцієнт, що враховує аерацію місцевості; K_α – коефіцієнт, що враховує забруднення атмосфери оксидом вуглецю залежно від величини повздовжнього нахилу магістральної траси; K_v – коефіцієнт, що враховує зміну концентрації оксиду вуглецю від швидкості вітру; K_w – коефіцієнт, що враховує зміну концентрації оксиду вуглецю від вологості повітря.

Для оцінки концентрації СО за цим методом запропонована наступна формула [13]:

$$C_{CO} = (0,5 + 0,01 \cdot N \cdot K_T) \cdot K_a \cdot K_\alpha \cdot K_v \cdot K_w \cdot K_{\Pi}, \quad (6.14)$$

де 0,5 – фонове забруднення атмосферного повітря нетранспортного походження, мг/м³; N – сумарна інтенсивність руху автомобілів на міській трасі, автомобілів/год; K_T – коефіцієнт токсичності автомобілів за викидами оксиду вуглецю в атмосферне повітря; K_{Π} – коефіцієнт, що враховує збільшення концентрації оксиду вуглецю на перехрестях автомагістралі з іншими дорогами.

Методика визначення коефіцієнтів, що входять до складу формули (6.14), наступна:

коефіцієнт токсичності автомобілів визначають як середньозважену величину для потоку автомобілів за формулою

$$K_T = \sum P_i \cdot \beta_c, \quad (6.15)$$

де P_i – склад рухомого транспорту в частках одиниць.

Коефіцієнт β_c – визначають за таблицею 6.3.

Таблиця 6.3. Значення коефіцієнта β_c , що враховує зміну концентрації оксиду вуглецю залежно від складу рухомого транспорту

Вид автотранспорту	Коефіцієнт β_c
Легкий вантажний	2,3
Середній вантажний	2,9
Важкий вантажний (дизельний)	0,2
Автобуси	3,7
Легковий	1,0

Коефіцієнт K_a , що враховує зміну концентрації оксиду вуглецю залежно від аерації місцевості, визначають за таблицею 6.4.

Таблиця 6.4. Значення коефіцієнта K_a , що враховує зміну концентрації діоксиду вуглецю залежно від аерації місцевості

Тип місцевості за ступенем аерації	Коефіцієнт K_a
Транспортні тунелі	2,7
Транспортні галереї	1,5
Магістральні траси й вулиці з багатоповерховими будівлями з двох сторін	10
Вулиці із житловими одноповерховими будівлями, дороги, розташовані у виїмках	0,6
Міські дороги й вулиці з односторонніми будівлями, прибережні естакади, насипи	0,4
Пішохідні тунелі	0,3
Магістральні траси з магістральною забудовою	1,0

Значення коефіцієнта K_a , що враховує зміну забруднення атмосферного повітря оксидом вуглецю залежно від величини повздовжнього нахилу автомагістралі α , визначають за таблицею 6.5.

Таблиця 6.5. Значення коефіцієнта K_a , що враховує зміну концентрації оксиду вуглецю в атмосфері залежно від кута автомагістралі

Кут повздовжнього нахилу α , град.	Коефіцієнт K_a
0	1,00
2	1,06
4	1,07
6	1,18
8	1,55

Значення коефіцієнтів, що враховують зміну концентрації оксиду вуглецю в атмосфері залежно від швидкості вітру та відносної вологості повітря, визначають за таблицями 6.6, 6.7.

Таблиця 6.6. Значення коефіцієнта K_v , що враховує зміни концентрації оксиду вуглецю в атмосфері залежно від швидкості вітру

Швидкість вітру V , м/с	Коефіцієнт K_v
1	2,70
2	2,00
3	1,50
4	1,20
5	1,05
6	1,00

Таблиця 6.7. Значення коефіцієнта K_w , що враховує зміни концентрації оксиду вуглецю в атмосфері залежно від відносної вологості повітря

Відносна вологість повітря W , %	Коефіцієнт K_w
100	1,45
90	1,30
80	1,15
70	1,00
60	0,85
50	0,75
40	0,60

Коефіцієнт K_n що враховує збільшення забруднення атмосферного повітря оксидом вуглецю залежно від типу перехрестя визначається за таблицею 6.8.

Таблиця 6.8. Значення коефіцієнта K_n що враховує зміну концентрації оксиду вуглецю на перехрестях автомагістралі та інших доріг

Тип перехрестя	Коефіцієнт K_n
Регульовані перехрестя:	
-звичайні за допомогою світлофорів;	1,8
-керовані світлофори;	2,1
-саморегульовані.	2,0
Нерегульовані перехрестя:	
-із зниженою швидкістю;	1,9
-кільцеві;	2,2
-з обов'язковою зупинкою.	3,0

Гранично допустиму концентрацію оксиду вуглецю під час роботи автотранспорту приймають 5 мг/м^3 [6, 14].

Приклад 6.2. Визначити рівень забруднення атмосферного повітря вихлопними газами автотранспорту, що рухається магістральною трасою – центральною вулицею м. Миколаєва. З двох сторін траси багатоповерхові будівлі, повздовжній нахил (кут) траси – 2° , швидкість вітру 4 м/с , відносна вологість повітря – 70% .

Розрахункова інтенсивність руху автомобілів (автобусів) в обох напрямках 500 автомобілів на годину (N). Склад транспортного потоку: 10% – вантажних автомобілів з малою вантажопідйомністю; 10% – із середньою вантажопідйомністю; 5% – з великою вантажопідйомністю з дизельними двигунами; 5% – автобусів і 70% – легкових автомобілів.

Перехрестя траси з іншими вулицями регульоване світлофорами, звичайне.

Розв'язок

За таблицею 6.3 визначаємо коефіцієнт β_c , що враховує зміну концентрації оксиду вуглецю залежно від заданого складу автотранспорту:

для легких вантажних – $2,3$;

для середніх вантажних – $2,9$;

для важких вантажних (дизельних) – $0,2$;

для автобусів – $3,7$;

для легкових автомобілів – $1,0$.

Підставивши у формулу (6.15) процентний склад рухомого автотранспорту та значення даних коефіцієнтів, отримуємо величину коефіцієнта токсичності автомобілів:

$$K_T = 0,1 \cdot 2,3 + 0,1 \cdot 2,9 + 0,05 \cdot 0,2 + 0,05 \cdot 3,7 + 0,7 \cdot 1 = 1,41.$$

За таблицею 6.4 на основі вихідних даних (магістральна траса з багатоповерховими будівлями з двох сторін) знаходимо коефіцієнт зміни концентрації оксиду вуглецю залежно від аерації – $K_a = 1,0$.

На основі вихідних даних (кута повздожнього нахилу траси 2°), за таблицею 6.5 знаходимо коефіцієнт зміни концентрації оксиду вуглецю залежно від кута повздожнього нахилу траси: $K_\alpha = 1,06$.

На основі вихідних даних (швидкості руху вітру 4 м/с) за таблицею 6.6 знаходимо коефіцієнт, що враховує зміну концентрації оксиду вуглецю: $K_v = 1,2$.

На основі вихідних даних (відносній вологості повітря 70%) за таблицею 6.7 знаходимо коефіцієнт зміни концентрації оксиду вуглецю: $K_w = 1,0$.

За таблицею 6.8 на основі вихідних даних (перехрестя звичайне, регулюється світлофором) знаходимо коефіцієнт збільшення концентрації оксиду вуглецю залежно від типу перехрестя: $K_\Pi = 1,8$.

Підставивши значення даних коефіцієнтів у формулу (6.14), отримуємо величину рівня концентрації оксиду вуглецю C_{CO} :

$$C_{CO} = (0,5 + 0,01 \cdot 500 \cdot 1,41) \cdot 1 \cdot 1,06 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 1,8 = 17,3 \text{ мг/м}^3.$$

Порівнюємо фактичний рівень забруднення атмосфери оксидом вуглецю ($17,3 \text{ мг/м}^3$) з гранично допустимою концентрацією (5 мг/м^3).

Висновок: Фактична концентрація оксиду вуглецю в атмосферному повітрі від автотранспортного потоку, що рухається на автомагістралі, перевищує ГДК у 3,45 рази.

Практична робота № 7

Розрахунок індивідуальних доз опромінення при прямих шляхах впливу радіоактивної хмари

Основним параметром, що характеризує забруднення атмосферного повітря є еквівалентна доза іонізуючого випромінювання – добуток дози поглинання випромінювання у біологічній тканині на середній коефіцієнт якості цього випромінювання в даній біологічній тканині [11].

При тривалому викиді зі змінною роззою вітрів та інших метеорологічних параметрів радіоактивну хмару часто розглядають, як джерело з формою напівнескінченного простору з рівномірно розподіленою в об'ємі активністю A_v , Бк/м³. Тоді потужність еквівалентної дози H , Зв/с, що утворюється на поверхні (не захищеному шарі) тіла людини на відкритій місцевості, розраховується за формулою

$$H = A_v \cdot B_{ay}, \quad (7.1)$$

де B_{ay} – дозовий коефіцієнт зовнішнього опромінювання фотонами від радіоактивної хмари, Зв·м³/(с·Бк).

Його числове значення можна отримати на основі закону променевої рівноваги – кількість випроміненої енергії в одиниці об'єму нескінченного се-

редовища з рівномірно розподіленою об'ємною активністю дорівнює кількості поглиненої енергії в цьому об'ємі [11].

Для 2π – геометрії опромінення на відкритій місцевості маємо:

$$B_{\alpha\gamma} = 6,75 \cdot 10^{-14} \cdot E, \quad (7.2)$$

де E – енергетичний вихід фотонів, МеВ/розп., $E = \sum_i^m n_i \cdot E_i$. Тут n_i – абсолютний вихід i -го фотону в схемі розпаду, фотон/розп., E_i – енергія i -го фотону, МеВ/фотон.

Значення дозового коефіцієнта зовнішнього опромінювання фотонами від радіоактивної хмари $B_{\alpha\gamma}$ для різних сумішей ізотопів Kr , Xe і I наведені у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1. Ефективний спектр фотонів і дозові коефіцієнти суміші ізотопів Kr , Xe і I ВВЕР-440

Суміш ізотопів	Величини	Витримка, t					
		0	5 хв	30 хв	1 год	12 год	24 год
$\sum Kr, Xe$	E , МеВ/розп.	0,693	0,637	0,503	0,444	0,158	0,107
	$B_{\alpha\gamma}$, мкЗв·м ³ /(год·Бк)	1,48	1,36	1,07	0,95	0,34	0,23
	$B_{\alpha\gamma}$, бер·м ³ /(с·Ки)	0,173	0,159	0,126	0,111	0,040	0,027
$\sum I$	E , МеВ/розп.	0,812	0,799	0,784	0,772	0,708	0,661
	$B_{\alpha\gamma}$, мкЗв·м ³ /(год·Бк)	1,73	1,70	1,67	1,64	1,51	1,41
	$B_{\alpha\gamma}$, бер·м ³ /(с·Ки)	0,203	0,200	0,196	0,193	0,177	0,165
$\sum Kr, Xe, I$	E , МеВ/розп.	0,779	0,761	0,743	0,721	0,601	0,505
	$B_{\alpha\gamma}$, мкЗв·м ³ /(год·Бк)	1,66	1,62	1,58	1,54	1,28	1,08
	$B_{\alpha\gamma}$, бер·м ³ /(с·Ки)	0,196	0,190	0,186	0,180	0,150	0,126

Об'ємна активність нукліда у атмосферному повітрі для безперервних та короточасних викидів пов'язана з потужністю викиду Q , Бк/с співвідношенням

$$A_v = Q \cdot G, \quad (7.3)$$

де G – фактор метеорологічного розбавлення при неперервному викиді, с/м³;
а для миттєвих викидів

$$A_v = Q_0 \cdot G_0, \quad (7.4)$$

де Q_0 – інтегральна величина миттєвого викиду, Бк; G_0 – фактор метеорологічного розбавлення при миттєвому викиді, 1/м³.

Тоді формула (7.1) набуває вигляду

$$H = Q_0 \cdot G_0 \cdot B_{\alpha\gamma}. \quad (7.5)$$

Величина Q_0 визначається за радіаційними характеристиками продуктів ділення і актиноїдів. Їхні значення для Kr , Xe і I для різних типів реакторів наведено у таблицях 7.2, 7.3.

Таблиця 7.2. Питома активність ізотопів Kr , Xe і I в опромінену паливі ВВЕР-440 A_m , Бк/т U

Нуклід	Витримка, t					
	0	5 хв	30 хв	1 год	12 год	24 год
$\sum Kr$	9,89+16	5,46+16	4,06+16	3,52+16	3,06+15	3,72+14
$\sum Xe$	1,87+17	1,37+17	1,07+17	9,71+16	9,21+16	7,83+16
$\sum I$	2,67+17	2,66+17	2,55+17	2,40+17	1,31+17	9,94+16

Таблиця 7.3. Питома активність ізотопів Kr , Xe і I в опромінену паливі ВВЕР-1000 A_m , Бк/т U

Нуклід	Витримка, t					
	0	5 хв	30 хв	1 год	12 год	24 год
$\sum Kr$	1,41+17	7,79+16	5,81+16	5,02+16	4,34+15	5,97+14
$\sum Xe$	2,66+17	1,93+17	1,49+17	1,36+17	1,32+17	1,13+17
$\sum I$	3,89+17	3,87+17	3,72+17	3,50+17	1,91+17	1,45+16

При короткочасному точковому викиді фактор метеорологічного розбавлення визначається за формулою [11]:

$$G(x, y, z) = \frac{F(x)}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right] \times \\ \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right] \right\}, \quad (7.6)$$

де x, y, z – Ейлерові координати точки у просторі; u – швидкість вітру, м/с; t – час після викиду; h – висота хмари викиду над землею на відстані x від викиду, м; $F(x)$ – функція збіднення хмари; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – стандартне відхилення розподілу домішки у хмарі викиду в напрямку відповідної координатної осі, м. Величина цих коефіцієнтів залежить від погодних умов і зростає зі збільшенням відстані від джерела викидів.

Максимальне значення фактора розбавлення на рівні землі

$$G(x_m, 0, 0) = \frac{2 \cdot F(x_m)}{e \cdot \pi \cdot u \cdot h^2} \cdot \frac{\sigma_z}{\sigma_y}, \quad (7.7)$$

де h (м) – висота струменю; x_m (м) – відстань від джерела викидів, на якій приземна концентрація за НМУ досягає найбільшого значення. Її можна отримати, після розв'язання рівняння:

$$\sigma_z(x_m) = \frac{h}{\sqrt{2}}. \quad (7.8)$$

При неперервному викиді середній за тривалий час (1 год.) фактор розбавлення визначають за формулою [11]

$$G = \frac{\eta}{(2 \cdot \pi)^{3/2} \cdot x} \cdot \sum_j \frac{\omega_j \cdot F_j}{\sigma_{z,j} \cdot u_j} \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{(z-h)^2}{2 \cdot \sigma_{z,j}^2} \right] - \exp \left[-\frac{(z+h)^2}{2 \cdot \sigma_{z,j}^2} \right] \right\}, \quad (7.9)$$

де j – категорія стійкості атмосфери; ω_j – повторюваність j -ї категорії за час викиду; u_j – середня швидкість вітру для j -ої погодної категорії; η – витягнутість рози вітрів у заданому напрямку, що визначається за формулою

$$\eta = \frac{n}{n_0}. \quad (7.10)$$

Тут n – повторюваність напрямку вітру в заданому азимутальному секторі при реальній розі вітрів; n_0 – те ж саме при круглій розі вітрів.

Максимальне значення фактора розбавлення на рівні землі при неперервному викиді визначають за формулою

$$G = \frac{2 \cdot \eta}{(2 \cdot \pi)^{3/2} \cdot x} \cdot \sum_j \frac{\omega_j \cdot F_j}{\sigma_{z,j} \cdot u_j} \cdot \exp \left[-\frac{h^2}{2 \cdot \sigma_{z,j}^2} \right]. \quad (7.11)$$

Вплив стійкості атмосфери на розсіювання домішки враховується шляхом введення поняття категорії стійкості, з яких на сьогодні найпоширенішою є система класифікації категорії стійкості атмосфери Пасквілла (таблиця 7.4). Категорія A відповідає дуже сильній; B – помірній; C – слабкій нестійкості атмосфери; F – нейтральному стану; E – слабкій; D – помірній стійкості.

Визначення категорії стійкості здійснюють згідно з вимірюванням швидкості вітру на висоті 10 м і якісною оцінкою інсоляції в денний час та хмарності в нічний період, що відраховується від години до заходу сонця до години після його сходу [11].

Таблиця 7.4. Категорії стійкості атмосфери за Пасквіллом

Швидкість вітру u на висоті 10 м, м/с	У денний час при інсоляції			У нічний час	
	інтенсив- ний	помірній	слабкий	Тонка суцільна хмарність або не менше 4/8 хмарного покриву	Не більше 3/8 хмарного покриву
$u < 2$	A	$A - B$	B	–	–
$2 \leq u < 3$	$A - B$	B	C	E	F
$3 \leq u < 5$	B	$B - C$	C	D	E
$5 \leq u < 6$	C	$C - D$	D	D	D
$6 \leq u$	C	D	D	D	D

При взаємодії повітряного потоку з поверхнею землі під впливом сил тертя виникає явище механічної турбулентності, інтенсивність якої залежить від швидкості вітру та мікрорельєфу поверхні. Вплив останнього фактору на розсіювання домішки враховується висотою шорсткості поверхні землі z_0 (таблиця 7.5).

Таблиця 7.5. Висота шорсткості z_0 для різних типів мікрорельєфу поверхні землі

Мікрорельєф	z_0 , см
Сніг, газон висотою 1 см	0,1
Скошена та низька трава до 15 см	0,6...2,0
Висока трава до 60 см	4 – 9
Неоднорідна поверхня з послідовними територіями трави, чагарниками	10 – 20
Парк, ліс висотою до 10 м	20 – 100
Міські будівлі	100

Фактори метеорологічного розбавлення можуть визначатися за наведеними вище рівняннями гауссової моделі атмосферної дифузії (формули 7.6, 7.11), або за номограмами (рис. 7.1, 7.2). Ці номограми побудовані для ефективної висоти викиду $h = 10...200$ м і висоти шорсткості $z_0 = 100$ см, $z_0 = 10$ см та швидкості вітру $u = 1$ м/с. За інших значень швидкості вітру отримані за номограмою величини слід помножити на поправочний коефіцієнт $k = 1/u$ (при короткочасних викидах), або $k = 1/\bar{u}_j$ (при безперервних викидах).

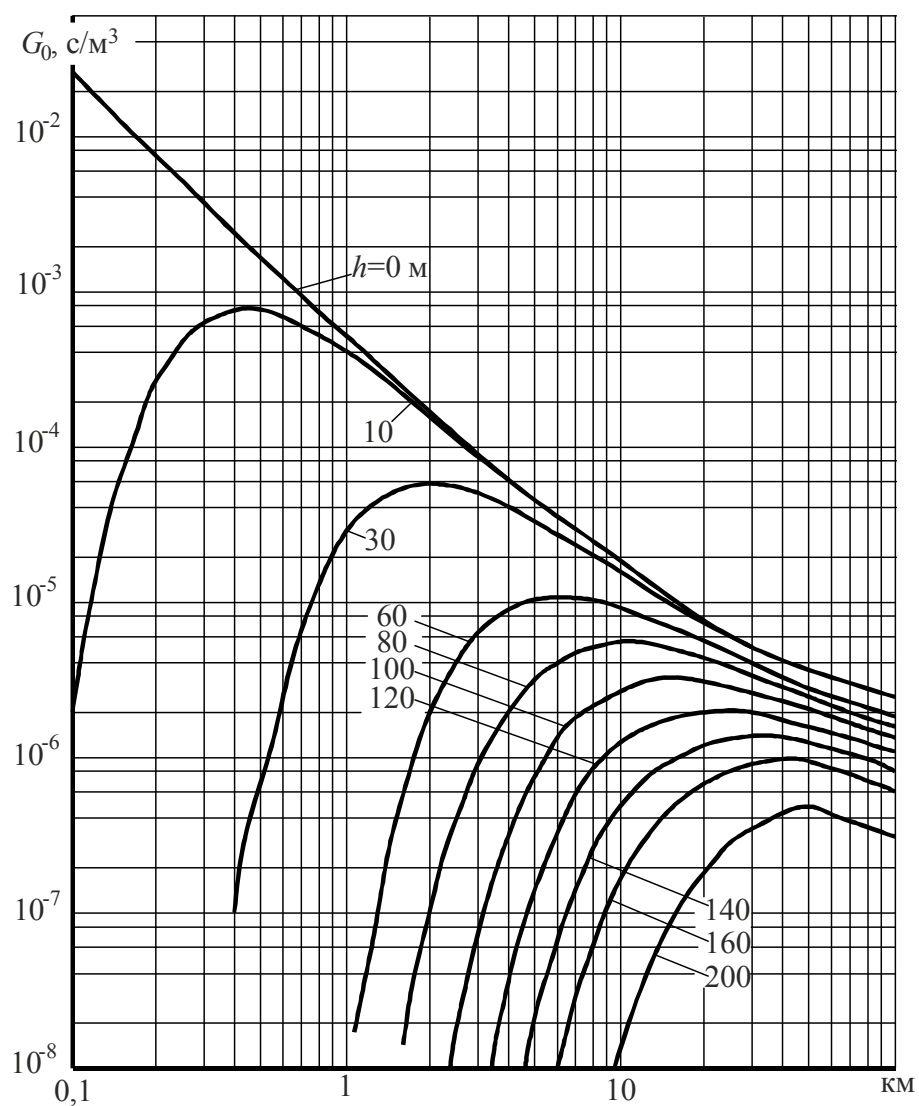


Рис 7.1. Фактори розбавлення при короткочасному викиді G , категорія F , висоті шорсткості $z_0 = 10 \text{ см}$

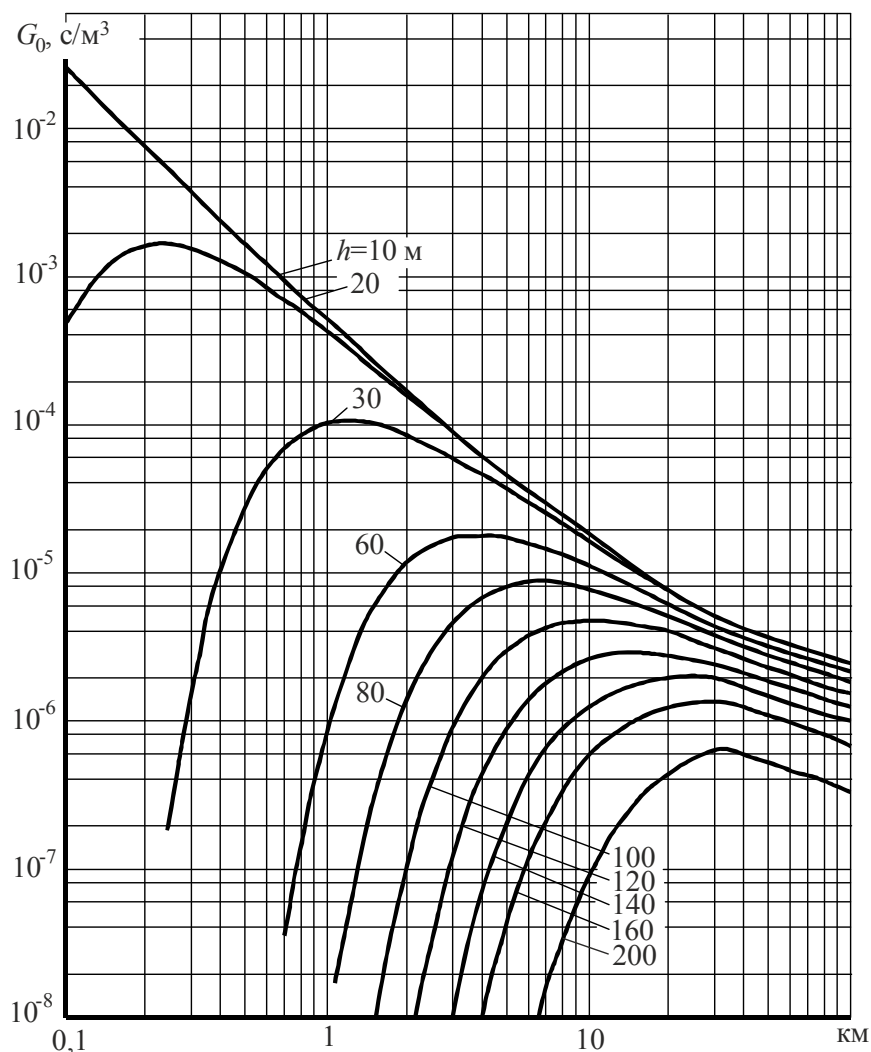


Рис 7.2. Фактори розбавлення при короткочасному викиді G , категорія F , висоті шорсткості $z_0 = 100$ см

Приклад 7. Розрахувати еквівалентну дозу, що створюється фотонним випромінюванням від хмари радіоактивних газів суміші ізотопів Kr і Xe для запроектої аварії на реакторі ВВЕР – 440, із завантаженням активної зони реактора ураном $m = 41,5$ т, коли 10 % загальної кількості ІРГ в активній зоні поступило в атмосферу. Ефективна висота викиду $h = 60$ м; попередня кампанія $T = 3$ роки; швидкість вітру $u = 1,6$ м/с; категорія погоди за Пасквілом F ; відстань $x = 3$ км; коефіцієнт шорсткості $z_0 = 10$ см (сільська місцевість); коефіцієнт екранування будинками $k_e = 0,4$. Фракціонуванням ізотопів Kr і Xe внаслідок затримки на різних бар'єрах знехтувати.

Розв'язок

1. За даних умов час руху радіоактивної хмари до точки детектування визначається за формулою:

$$t = \frac{x}{u} = \frac{3000}{1,6} = 1870 \text{ с} \approx 30 \text{ хв.}$$

2. Питома активність суміші ізотопів, за таблицею 7.2, складає:

$$A_{Kr} = 4,06 \cdot 10^{16} \text{ Бк/т}$$

$$A_{Xe} = 1,07 \cdot 10^{17} \text{ Бк/т.}$$

3. Повна активність суміші ІРГ, що досягає детектора, визначається за формулою

$$Q_o = \sum_1^n A_i \cdot m \cdot x = (0,41 + 1,07) \cdot 10^{17} \cdot 41,5 \cdot 0,1 = 6,14 \cdot 10^{17} \text{ Бк} = 1,66 \cdot 10^7 \text{ Кі.}$$

4. За рис. 7.1 в залежності від категорії погоди, коефіцієнта шорсткості визначаємо коефіцієнт метеорологічного розбавлення:

$$G_o = 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ с/м}^3.$$

Перераховуємо на швидкість вітру $u = 1,6 \text{ м/с}$ і отримуємо

$$G_o = \frac{6,0 \cdot 10^{-5}}{1,6} = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ с/м}^3.$$

5. За таблицею 7.1 визначаємо дозовий коефіцієнт зовнішнього опромінення фотонами від радіоактивної хмари. Для суміші ізотопів Kr і Xe :

$$B_{\alpha\gamma} = 1,07 \text{ мкЗв} \cdot \text{м}^3 / (\text{рік} \cdot \text{Бк}) = 0,126 \text{ бер} \cdot \text{м}^3 / (\text{с} \cdot \text{Кі}).$$

6. Еквівалентна доза H від короточасного викиду Q_o розраховується за формулою

$$\begin{aligned} H_o &= Q_o \cdot B_{\alpha\gamma} \cdot G_o \cdot k_e = 6,14 \cdot 10^{17} \cdot 1,07 \cdot 3,8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,4 / 3,16 \cdot 10^7 = \\ &= 0,31 \cdot 10^6 \text{ мкЗв} = 31 \text{ Зв} \end{aligned}$$

$$H_o = Q_o \cdot B_{\alpha\gamma} \cdot G_o \cdot k_e = 1,66 \cdot 10^7 \cdot 0,126 \cdot 3,8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,4 = 31 \text{ бер.}$$

Список літератури

1. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, ОНД-86 [Текст]. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 94 с.
2. **Благодатний, В. В.** Розрахунок розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі [Текст] : метод. вказівки / В. В. Благодатний, Н. І. Магась. – Миколаїв : НУК, 2009. – 41 с.
3. **Берлянд, М. Е.** Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы [Текст] / М. Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
4. **Лейкин, И. И.** Рассеивание вентиляционных выбросов химических предприятий (проектирование и расчет) [Текст] / И. И. Лейкин. – М. : Химия, 1982. – 224 с.
5. **Лаврик, В. І.** Моделювання і прогнозування стану довкілля [Текст] : підручник / В. І. Лаврик, В. М. Боголюбов, Л. М. Полетаєва та ін. – К. : ВЦ «Академія», 2010. – 400 с.
6. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. / Затверджено наказом Міністерства охорони здоров'я України №173 від 19.07.1996г. – К., 1996.
7. Экология города [Текст] : учебник. – К. : Лібра, 2000. – 464 с.
8. **Шаприцкий, Н. М.** Разработка нормативов ПДВ для защиты атмосферы [Текст]: Справ. / Н. М. Шаприцкий – М. : Металлургия, 1990. – 416 с.
9. **Родионов, А. И.** Защита биосферы от промышленных выбросов. Основы проектирования технологических процессов [Текст] / А. И. Родионов, Ю. П. Кузнецов, Г. С. Соловьев – М. : Химия, КолосС, 2005. – 392 с.
10. **Гримитлин, М. И.** Вентиляция и отопление цехов машиностроительных заводов [Текст] / М. И. Гримитлин, О. Н. Тимофеева, В. М. Эльтерман – М. : Машиностроение, 1978. – 272 с.
11. **Гусев, Н. Г.** Радиоактивные выбросы в биосферу [Текст] : справочник / Н. Г. Гусев, В. А. Беляев; 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
12. **Козаченко, В. И.** Экологическая безопасность воздушной среды [Текст] : учебно-методическое пособие. / В. И. Козаченко, В. Б. Колобашкина, Т. А. Пожарова, Б. И. Попов и др. – СПб. : СПбГУАП, 2003. – 44 с.
13. **Чекмарева, О. В.** Оценка роли автодорожного комплекса в формировании атмосферного воздуха [Текст] : методические указания к практическим занятиям / О. В. Чекмарева, Е. В. Бондаренко. – Оренбург. : ГОУ ОГУ, 2004. – 43 с.
14. **Луканин, В. Н.** Промышленно-транспортная экология [Текст] : учебник для вузов / В. Н. Луканин, Ю. В. Трофименко ; под ред. В. Н. Луканина. – М. : Высшая школа, 2001. – 273с.
15. **Эльтерман, В. М.** Охрана воздушной среды на химических и нефтеперерабатывающих предприятиях [Текст] / В. М. Эльтерман. – М. : Химия, 1985. – 160 с.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
<i>Практична робота № 1. Розрахунок максимальної приземної концентрації шкідливої домішки.....</i>	<i>5</i>
<i>Практична робота № 2. Розрахунок поля концентрації шкідливої домішки.....</i>	<i>11</i>
<i>Практична робота № 3. Моделювання розсіювання забруднюючих речовин на місцевості зі складним рельєфом.....</i>	<i>15</i>
<i>Практична робота № 4. Прогнозування рівня забруднення атмосферного повітря на промисловому майданчику з урахуванням впливу забудови.....</i>	<i>20</i>
<i>Практична робота № 5. Розрахунок осьової концентрації забруднюючої речовини на різних відстанях з урахуванням впливу забудови.....</i>	<i>21</i>
<i>Практична робота № 6. Прогнозування рівня забруднення атмосферного повітря на ділянці магістральної траси.....</i>	<i>32</i>
<i>Практична робота № 7. Розрахунок індивідуальних доз опромінення при прямих шляхах впливу радіоактивної хмари.....</i>	<i>41</i>
Список літератури.....	49