

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Кафедра екології та технологій захисту навколишнього середовища

В.Є. Колесник, Ю.В. Бучавий

МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОСИСТЕМ І ПРОЦЕСІВ

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт

для здобувачів ступеня магістра

освітньо-професійної програми «Екологія» зі спеціальності Е2 Екологія,

освітньо-професійної програми «Технології захисту навколишнього середовища» зі спеціальності G2 Технології захисту навколишнього середовища

Дніпро
НТУ «ДП»
2026

Моделювання екосистем і процесів [Електронний ресурс] : методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт для здобувачів ступеня магістра освітньо-професійної програми «Екологія» зі спеціальності Е2 Екологія, освітньо-професійної програми «Технології захисту навколишнього середовища» зі спеціальності G2 Технології захисту навколишнього середовища / уклад.: В.Є. Колесник, Ю.В. Бучавий ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2026. – 44 с.

Укладачі:

В.Є. Колесник, д-р техн. наук, проф.

Ю.В. Бучавий, канд. біол. наук, доц.

Затверджено науково-методичними комісіями зі спеціальностей Е2 Екологія (протокол № 12 від 06.07.2026) та G2 Технології захисту навколишнього середовища (протокол № 15 від 28.08.2026) за поданням кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища (протокол № 12 від 29.06.2026).

Подано теоретичні відомості за відповідними темами лекційного курсу, варіанти лабораторних завдань з рекомендаціями до їх виконання, контрольні питання, список використаної та рекомендованої літератури.

Орієнтовано на забезпечення навчального процесу здобувачів ступеня магістра освітньо-професійної програми «Екологія» зі спеціальності Е2 Екологія, освітньо-професійної програми «Технології захисту навколишнього середовища» зі спеціальності G2 Технології захисту навколишнього середовища.

Відповідальний за випуск завідувач кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища О. О. Борисовська, канд. техн. наук, доц.

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Методичні рекомендації до виконання циклу лабораторних робіт базуються на основних теоретичних положеннях лекційного курсу «Моделювання екосистем і процесів» стосовно математичного моделювання екологічних систем та процесів забруднення компонентів довкілля за допомогою сучасного комп'ютерного програмного забезпечення.

Порядок виконання робіт викладено за типовою схемою: тема, мета лабораторної роботи, результати навчання, що очікуються при її виконанні (згідно з робочою програмою дисципліни) завдання, подання відповідних теоретичних положень, окремі завдання для самостійного виконання та питання для самоконтролю з дисципліни.

Мета лабораторних робіт полягає в формуванні у майбутніх фахівців (магістрів) знань, умінь та навичок, необхідних для вирішення завдань у природоохоронній галузі, зокрема математичного моделювання процесів забруднення атмосферного повітря та водного середовища, оцінки небезпеки для біоти і здоров'я населення з використанням сучасного комп'ютерного програмного забезпечення, а також аналізу інформації, отримуваної на основі планування і прикладних досліджень з проблем впливу промислових об'єктів на навколишнє середовище з екологічною оцінкою їх впливу, необхідною для підготовки управлінських рішень з покращення стану довкілля на прилеглих територіях.

Поставлена мета досягається послідовним вирішенням певних типових завдань по кожній лабораторній роботі:

- ознайомлення з теоретичними положеннями, моделями обчислювальних експериментів і методами математичного моделювання певних об'єктів;
- ознайомлення з порядком проведення побудови певної математичної моделі, її апробації та верифікації;
- проведення обчислювального експерименту на певних моделях і розрахунків відповідних показників за вихідними даними, отриманими як за результатами наявних даних з форм статистичної звітності підприємств відповідно до варіанту так і експериментальних в т. ч. випадкових для відтворення певного сценарію з небезпечних наслідків.

В результаті виконання циклу лабораторних робіт студенти-магістри повинні набути конкретні практичні навички з:

- застосовування сучасного програмного забезпечення, що використовується для побудови моделей екологічних систем та процесів;
- формування даних для характеристики екологічного стану території на основі виконаних прикладних досліджень;
- використання форм статистичної звітності підприємств для формування бази даних стосовно джерел забруднення прилеглих до підприємств територій;
- формування вихідних даних до математичної моделі процесів забруднення навколишнього середовища на основі прикладних досліджень

рівнів забруднення;

- використання результатів математичного моделювання для оцінки змін параметрів навколишнього середовища;
- володіння методами оцінювання впливу промислових об'єктів на навколишнє середовище та наслідків інженерної діяльності на довкілля і пов'язану з цим відповідальність за прийняття рішень;
- планування і проведення прикладних досліджень з проблем впливу промислових об'єктів на навколишнє середовище.

Виконання лабораторних робіт передбачає підготовку вихідних даних з відкритих джерел, зокрема форми статистичної звітності підприємств, документи з оцінки впливу на довкілля, регіональні доповіді про стан навколишнього середовища.

Лабораторні роботи виконуються як обчислювальні експерименти, з використанням зібраних даних, на запропонованих математичних моделях, реалізованих за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Після побудови математичної моделі обчислювальний експеримент повторюється, але зі зміненими вихідними даними, що прогнозуються після рекомендованого впровадження певних заходів або технічних чи технологічних рішень, спрямованих на покращення якості та рівня екологічної безпеки досліджуваного об'єкта навколишнього середовища.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Тема: моделювання процесів дифузії-переносу домішки від організованого джерела на основі стаціонарної моделі Гауса з урахуванням класів стійкості атмосфери

Мета роботи: відтворити стаціонарну модель атмосферної дифузії забруднювальних речовин у програмному середовищі Mathcad.

Матеріали та обладнання: програмне середовище *PTC Mathcad* (або Mathcad Prime), форми звітності підприємств 2-тп (повітря).

У результаті виконання роботи будуть сформовані наступні **результати навчання:**

- ❖ Застосовувати сучасне програмне забезпечення, що використовується для побудови моделей екологічних систем та процесів ;

- ❖ Використовувати форми статистичної звітності підприємств для формування бази даних стосовно джерел забруднення прилеглих до підприємств територій;

- ❖ Володіти методами оцінювання впливу промислових об'єктів на навколишнє середовище та наслідків інженерної діяльності на довкілля і пов'язану з цим відповідальність за прийняття рішень;

- ❖ Формувати вхідні дані до математичної моделі процесів забруднення навколишнього середовища на основі прикладних досліджень рівнів забруднення.

Постановка задачі

Котельня на станції Синельниково здійснює викид діоксиду азоту. Виконати прогноз рівня забруднення повітряного середовища на основі моделі Гауса. Напрямок вітру співпадає з віссю X , висотою підйому факелу знехтувати, забруднююча речовина не піддається фізико-хімічним перетворюванням та не поглинається земною поверхнею.

Завдання роботи:

1. Побудувати модель атмосферної дифузії забруднювальних речовин згідно наведених рекомендацій в програмному середовищі Mathcad
2. Дослідити які характеристики впливають на характер розподілу забруднювальних речовин
3. Візуалізувати результати моделювання та експортувати їх до формату *.pdf*.

Теоретична частина

Моделювання атмосферної дисперсії – це математичне моделювання поширення забруднювачів повітря в атмосфері. Воно здійснюється за допомогою комп'ютерних програм і алгоритмів, що імітують дисперсію забруднювача. Дисперсійні моделі використовуються для оцінки концентрації забруднювачів повітря або токсинів, що викидаються з джерел, таких як промислові підприємства, автомобільний рух або випадкові викиди хімічних

речовин. Вони також можуть бути використані для прогнозування майбутніх концентрацій в конкретних сценаріях. Таким чином, дисперсійні моделі є домінуючим типом моделі, використовуваної при формуванні політики якості повітря. Вони є найбільш корисними при дослідженні забруднюючих речовин, які розосереджені на великі відстані і які можуть вступати в реакцію в атмосфері. Ці моделі також використовуються для забруднюючих речовин, які мають дуже високу просторово-часову мінливість (тобто мають дуже велику відстань до початкового розпаду, таких як вуглець) і для епідеміологічних досліджень статистики земельного використання.

Моделі розсіювання повітря також використовують для планування випадкових викидів хімічних речовин, визначення наслідків аварійних викидів небезпечних або токсичних матеріалів. Аварійні викиди можуть стати причиною пожежі або вибуху, які пов'язані з небезпечними матеріалами, такими як хімічні речовини або радіонукліди. Результати моделювання дисперсії можуть забезпечити оцінку розташування зон впливу та концентрацій в навколишньому середовищі. Відповідні захисні заходи можуть включати в себе евакуацію або укриття на місці для осіб, які перебувають в підвітряний напрямку.

Моделі дисперсій відрізняються залежно від методів, що використовуваної для розробки моделі, але всі вони вимагають вхідних даних:

- ❖ Метеорологічні умови, такі як швидкість і напрям вітру, кількість атмосферної турбулентності, температура навколишнього повітря, хмарність та сонячна радіація.

- ❖ Концентрація або кількість токсинів в емісії і температура матеріалу

- ❖ Викиди або такі параметри, як висота розташування джерела, тип джерела (тобто, вогонь, басейн або вентиляційний стік) і швидкість виходу, температура на виході і швидкість вивільнення.

- ❖ Підвищення території в місці розташування джерела і на місці об'єктів що знаходяться під впливом джерела, такі як прилеглі будинки, школи, підприємства і лікарні.

- ❖ Розташування, висота і ширина яких-небудь перешкод (наприклад, будівель або інших споруд) на шляху випромінюваного газового факела, шорсткість поверхні (або більш загальне означення - «сільська» або «міська» місцевість).

Моделі розсіювання в атмосфері також відомі як атмосферні дифузійні моделі, моделі розсіювання повітря, моделі якості повітря і моделі розсіювання забруднення повітря.

Стационарна модель Гауса

Інтегруючи по часу концентрацію забруднень, що викидаються з безперервного джерела, можна отримати сталий розподіл концентрації для стаціонарної моделі Гауса (1)

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z + H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

В обох випадках напрямок вітру збігається з напрямком віссі Y в цій моделі також передбачається, що має місце відбиття забруднюючої речовини від поверхні землі. Відображення характеризується членом в фігурних дужках. Модель побудована на припущенні однорідності і стійкості атмосфери.

Представлена модель має ряд недоліків:

- ❖ Не враховує рельєф поверхні
- ❖ Не враховує зміну метеорологічних параметрів в просторі і в часі
- ❖ Не описує роботу джерел забруднення працюючих протягом обмеженого часу
- ❖ Використовуються характеристики отримані лише для наземних джерел
- ❖ Не враховує вертикальну структуру граничного шару

Гаусові моделі можуть адекватно описувати розподіл забруднюючої речовини тільки в горизонтальному напрямку, для розрахунку вертикального профілю вони можуть бути застосовані на дуже коротких відстанях.

Для урахування класів стійкості атмосферного повітря залежно від метеорологічних умов (конверсія, ізотермія, інверсія) використовують підхід, запропонований Пасквіллом, табл. 1.

Таблиця 1 – Класи стійкості атмосфери за Пасквіллом

Швидкість вітру, м/с	Класи стійкості атмосфери А-Ф				
	Денний час. Рівень сонячного освітлення			Нічний час. Хмарно	
	Сильний	Середній	Слабкий	>50%	<50%
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Запропонований підхід дозволяє уточнити параметр вертикальної дифузії забруднювальних речовин залежно від класу стійкості атмосферного повітря, що суттєво впливає на результати розрахунку приземних концентрацій довкола джерела забруднення.

Практична реалізації методики Гауса та удосконаленої моделі Пасквіла у програмі Mathcad

Заносимо до програми вихідні дані для побудови моделі, а саме інтенсивність викиду, швидкість повітря, висоту джерела, та ГДК забруднювальної речовини, згідно прикладу, наведеному на рис. 1.1.

Вхідні дані:

Номер варіанту	$N_{var} := 10$
Інтенсивність викиду, г/с	$Q := 1 \cdot N_{var} = 10$
Швидкість повітря, м/с	$V_w := 3$
Висота джерела, м	$h := 10$
Гранично-допустима концентрація забруднювача, мг/м ³	$C_{ГД} := 0.085$

Рисунок 1.1 – Введення вхідних даних до моделювання через змінні

Задаємо клас стійкості атмосферного повітря через змінну S та прописуємо алгоритм для присвоєння коефіцієнту горизонтальної дифузії забруднювальних речовин за віссю X (та Y) і вертикальної дифузії за віссю Z , рис. 1.2:

Коефіцієнт вертикальної дифузії, м²/с

$S := 2$

Коефіцієнт горизонтальної дифузії, м²/с

Клас стійкості атмосфери за Пасквілом A-F(1-6)

$$\mu_y(x) := \begin{cases} 0.22 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x)^{-0.5} & \text{if } S = 1 \\ 0.16 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x)^{-0.5} & \text{if } S = 2 \\ 0.11 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x)^{-0.5} & \text{if } S = 3 \\ 0.08 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x)^{-0.5} & \text{if } S = 4 \\ 0.06 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x)^{-0.5} & \text{if } S = 5 \\ 0.04 \cdot x \cdot (1 + 0.0015 \cdot x)^{-0.5} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\mu_z(x) := \begin{cases} 0.2 \cdot x & \text{if } S = 1 \\ 0.12 \cdot x & \text{if } S = 2 \\ 0.08 \cdot x \cdot (1 + 0.0002 \cdot x)^{-0.5} & \text{if } S = 3 \\ 0.06 \cdot x \cdot (1 + 0.0015 \cdot x)^{-1} & \text{if } S = 4 \\ 0.03 \cdot x \cdot (1 + 0.0003 \cdot x)^{-1} & \text{if } S = 5 \\ 0.016 \cdot x \cdot (1 + 0.0003 \cdot x)^{-1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Рисунок 1.2 – Алгоритм визначення коефіцієнту горизонтальної дифузії забруднювальних речовин за класом стійкості

Заносимо залежність впливу висоти приземного шару Ft на ефективність підйому газоповітряної хмари з джерела забруднення, рис. 1.3:

$Ft := 50$

$$\Delta H(x) := h + \left[\frac{1}{1.6 (Ft)^3} \cdot \frac{2}{(x)^3} \cdot (V_w)^{-1} \right]$$

$$x_f := \begin{cases} 49 \cdot (Ft)^{0.625} & \text{if } Ft < 55 \\ (119 \cdot Ft^{0.4}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Рисунок 1.3 – Алгоритм визначення коефіцієнту горизонтальної дифузії забруднювальних речовин за класом стійкості

Прописуємо алгоритми для визначення зміни швидкості вітру з висотою залежно від класу стійкості атмосфери, і висоту ефективного підйому пилогазової хмари, рис. 1.4:

$$\begin{aligned}
 V_z(z) &:= \begin{cases} V_w \cdot \left(\frac{z + 0.01}{10} \right)^{0.07} & \text{if } S = 1 \\ V_w \cdot \left(\frac{z + 0.01}{10} \right)^{0.08} & \text{if } S = 2 \\ V_w \cdot \left(\frac{z + 0.01}{10} \right)^{0.1} & \text{if } S = 3 \\ V_w \cdot \left(\frac{z + 0.01}{10} \right)^{0.15} & \text{if } S = 4 \\ V_w \cdot \left(\frac{z + 0.01}{10} \right)^{0.35} & \text{if } S = 5 \\ V_w \cdot \left(\frac{z + 0.01}{10} \right)^{0.55} & \text{otherwise} \end{cases} \\
 \Delta H_e(x, S) &:= \begin{cases} \text{if } S = 5 \vee S = 6 \\ \text{if } 1.84 \cdot V_w \cdot 0.02^{-0.5} \geq x_f \\ \begin{cases} \frac{1}{1.6 \cdot Ft^3} \cdot x^{\frac{2}{3}} \cdot V_w^{-1} & \text{if } x < x_f \\ \frac{1}{1.6 \cdot Ft^3} \cdot x_f^{\frac{2}{3}} \cdot V_w^{-1} & \text{otherwise} \end{cases} \\ \frac{1}{1.6 \cdot Ft^3} \cdot x^{\frac{2}{3}} \cdot V_w^{-1} & \text{if } x < 1.84 \cdot V_w \cdot 0.02^{-0.5} \\ 2.4 \cdot \left(\frac{Ft}{V_w \cdot 0.02} \right)^{\frac{1}{3}} & \text{otherwise} \\ \text{if } S < 5 \\ \begin{cases} \frac{1}{1.6 \cdot Ft^3} \cdot x^{\frac{2}{3}} \cdot V_w^{-1} & \text{if } x < x_f \\ \frac{1}{1.6 \cdot Ft^3} \cdot x_f^{\frac{2}{3}} \cdot V_w^{-1} & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \\
 V_z(100) &= 3.607 \\
 x_f &= 565.005
 \end{aligned}$$

Рисунок 1.4 – Алгоритми для визначення зміни швидкості вітру з висотою та висоти ефективного підйому пилогазової хмари

Далі задаємо основну формулу що реалізує методіку Гауса з урахуванням моделі Пасквілла та перевіряємо роботу моделі – підставляємо до функції C_m довільні значення в системі координат XYZ), рис. 1.5:

Методика розрахунку (за моделю Гауса):

Концентрація забруднювача $C_m, \text{мг/м}^3$ в точці з координатами x, y, z визначається за формулою:

$$C_m(x, y, z) := \frac{Q \cdot e^{-\frac{V_z(z) \cdot y^2}{4 \cdot \mu_y(x) \cdot x}} \left[e^{-\frac{V_z(z) \cdot (h + \Delta H_e(x, S) - z)^2}{4 \cdot \mu_z(x) \cdot x}} + e^{-\frac{V_z(z) \cdot (h + \Delta H_e(x, S) + z)^2}{4 \cdot \mu_z(x) \cdot x}} \right]}{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\mu_y(x) \cdot x}{V_z(z)}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_z(x) \cdot x}{V_z(z)}}} \cdot 1000$$

Поточний розрахунок $C_m(50, 0, 0) = 1.148 \quad \text{мг/м}^3$

Рисунок 1.5 – Введення основної формули за удосконаленою моделлю Гауса та перевірка її функціонування

Будуємо графіки для відображення змін концентрацій забруднювальних речовин вздовж віссю X та Y, рис. 1.6:

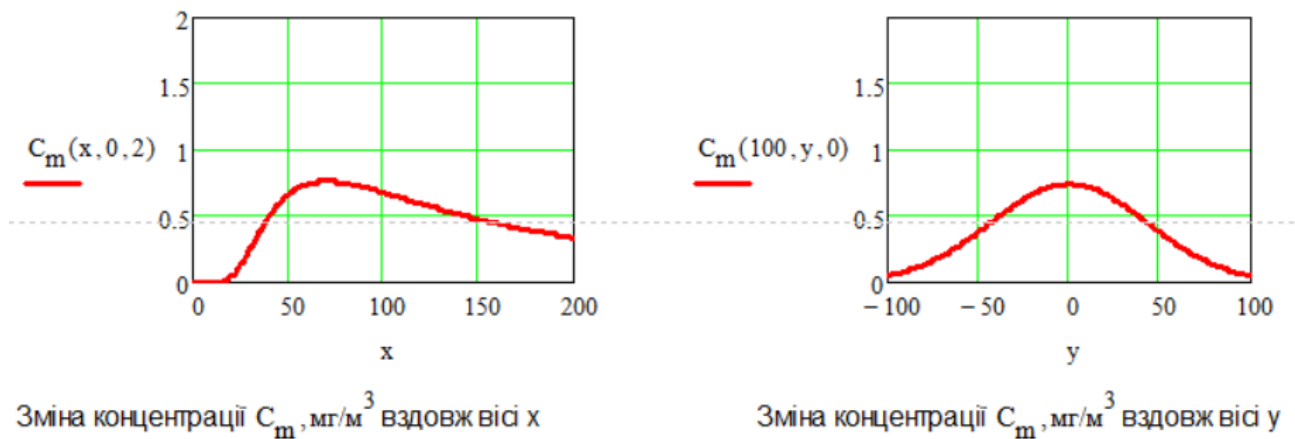


Рисунок 1.6 – Оцінка змін приземних концентрацій забруднювальної речовин по мірі віддалення від джерела викидів

Модифікуємо основну формулу для отримання результатів в одиницях ГДК, рис. 1.7

$$C_m(x, y, z) := \left[\frac{Q \cdot e^{-\frac{V_z(z) \cdot y^2}{4 \cdot \mu_y(x) \cdot x}} \left[e^{-\frac{V_z(z) \cdot (h + \Delta H e(x, S) - z)^2}{4 \cdot \mu_z(x) \cdot x}} + e^{-\frac{V_z(z) \cdot (h + \Delta H e(x, S) + z)^2}{4 \cdot \mu_z(x) \cdot x}} \right]}{4 \cdot \pi \cdot C_{ГД} \cdot \sqrt{\frac{\mu_y(x) \cdot x}{V_z(z)}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_z(x) \cdot x}{V_z(z)}}} \right] \cdot 1000$$

Поточний розрахунок: $C_m(100, 0, 2) = 7.968$ ГДК

Рисунок 1.7 – Отримання розрахунків приземних концентрацій забруднювальних речовин в долях ГДК

Модифікуємо основну формулу для розрахунку значень в системі координат XZ, рис. 1.8

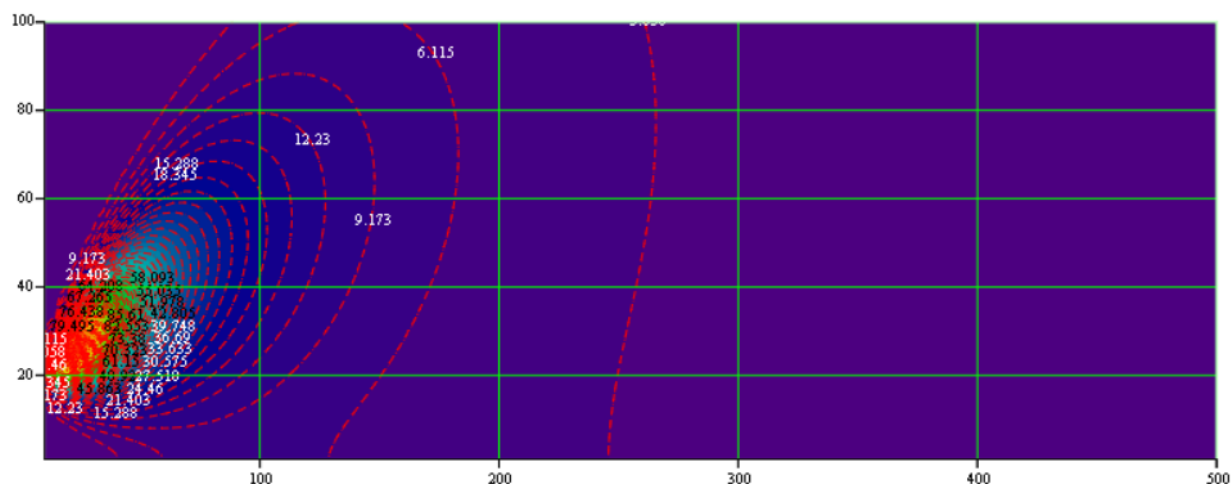
Відстань від місця викиду вздовж вісі x, м

y := 10

$$C_m(x, z) := \left[\frac{Q \cdot e^{-\frac{V_w \cdot y^2}{4 \cdot \mu_y(x) \cdot x}} \left[e^{-\frac{V_w \cdot (h + \Delta H e(x, S) - z)^2}{4 \cdot \mu_z(x) \cdot x}} + e^{-\frac{V_w \cdot (h + \Delta H e(x, S) + z)^2}{4 \cdot \mu_z(x) \cdot x}} \right]}{4 \cdot \pi \cdot C_{ГД} \cdot \sqrt{\frac{\mu_y(x) \cdot x}{V_w}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_z(x) \cdot x}{V_w}}} \right] \cdot 1000$$

Рисунок 1.8 – Формула для розрахунку значень в системі координат XZ

Виводимо двовимірний графік зміни концентрацій у системі координат XZ, рис. 1.9.



C_m

Рисунок 1.9 – Графік дифузії забруднювальних речовин за приземною концентрацією у системі координат XZ

Заносимо формулу для побудови профільного графіку у системі координат YZ, рис. 10

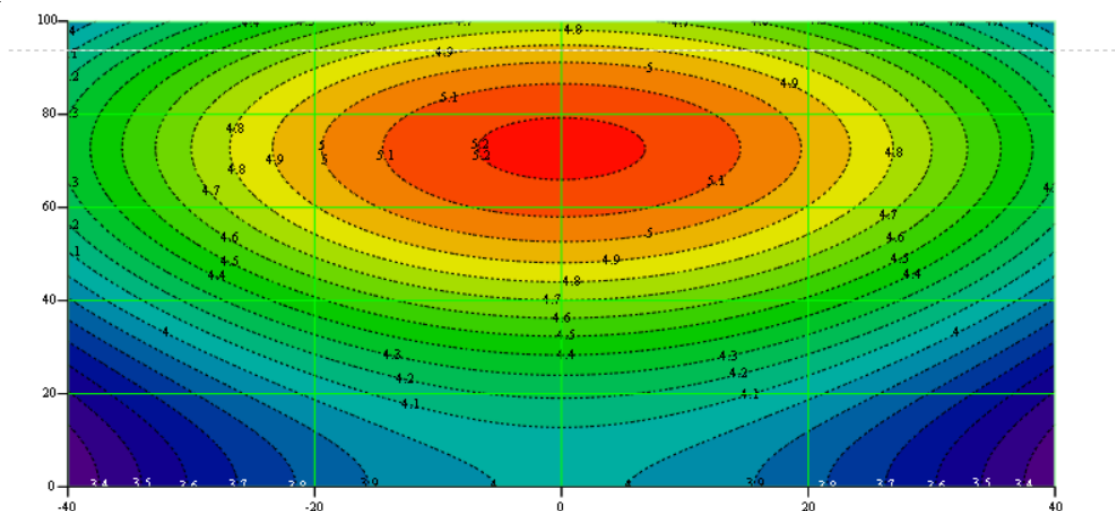
Відстань від місця викиду вздовж вісі x, м

$x := 200$

$$C_m(y, z) := \frac{Q \cdot e^{-\frac{V_w \cdot y^2}{4 \cdot \mu_y(x) \cdot x}} \left[e^{-\frac{V_w \cdot (h + \Delta H_e(x, S) - z)^2}{4 \cdot \mu_z(x) \cdot x}} + e^{-\frac{V_w \cdot (h + \Delta H_e(x, S) + z)^2}{4 \cdot \mu_z(x) \cdot x}} \right]}{4 \cdot \pi \cdot C_{ГД} \cdot \sqrt{\frac{\mu_y(x) \cdot x}{V_w}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_z(x) \cdot x}{V_w}}} \cdot 1000$$

Рисунок 1.10 – Формула розрахунку значень в системі координат XY

Виводимо двовимірний графік зміни концентрацій у системі координат YZ, рис. 1.11.



C_m Графік розподілу концентрації C_m (у долях ГДК) вздовж вісі y на відстані від викиду x

Рисунок 1.11 – Дифузії забруднювальних речовин в системі координат YZ

Заносимо формулу для побудови профільного графіку у системі координат ХУ, рис. 1.12.

Висота на якій вимірюється концентрація, м

$z := 2$

$$C_{\text{м}}(x, y) := \frac{Q \cdot e^{-\frac{V_w \cdot y^2}{4 \cdot \mu_y(x) \cdot x}} \left[e^{-\frac{V_w \cdot (h + \Delta H \epsilon(x, S) - z)^2}{4 \cdot \mu_z(x) \cdot x}} + e^{-\frac{V_w \cdot (h + \Delta H \epsilon(x, S) + z)^2}{4 \cdot \mu_z(x) \cdot x}} \right]}{4 \cdot \pi \cdot C_{\Gamma D} \cdot \sqrt{\frac{\mu_y(x) \cdot x}{V_w}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_z(x) \cdot x}{V_w}}} \cdot 1000$$

Рисунок 1.12 – Формула для розрахунку значень в системі координат ХУ

Будуємо графік розподілу приземних концентрацій у системі координат ХУ (як на плані), рис. 1.13

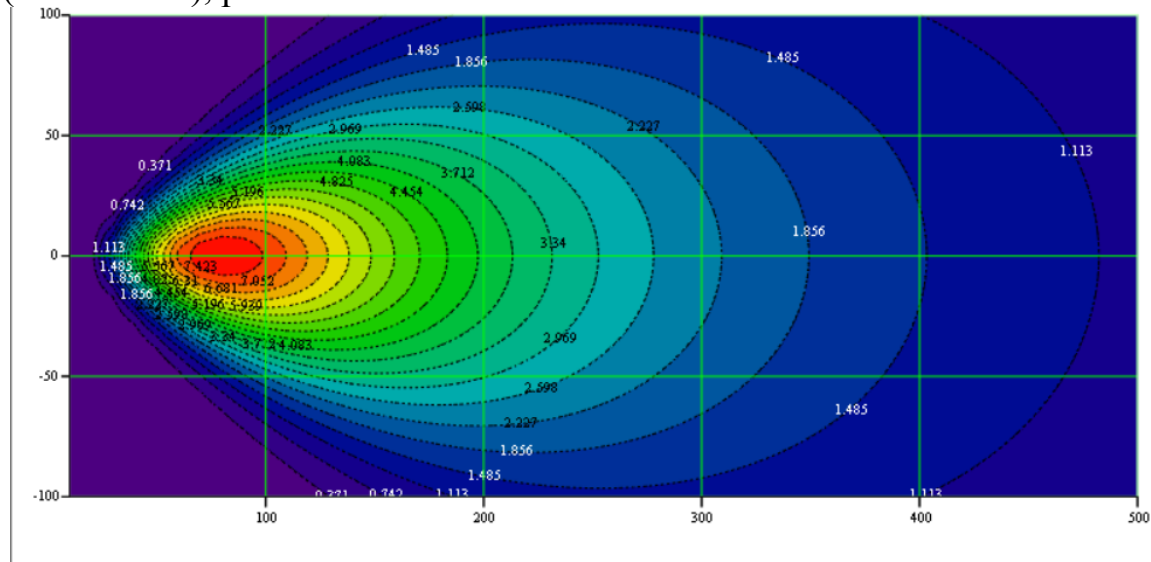


Рисунок 1.12 – Дифузії забруднювальних речовин в системі координат УХ

Виводимо тривимірний графік розподілу приземних концентрацій, рис.1.14

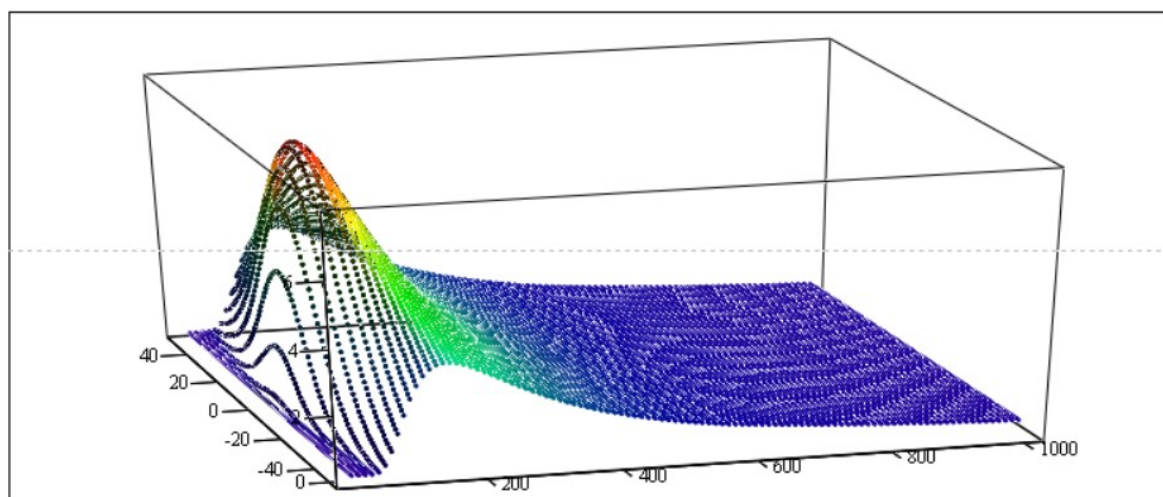


Рисунок 1.13 – Дифузії забруднювальних речовин в системі координат ХYZ

Контрольні запитання

1. Які основні обмеження використання «стандартної» моделі Гауса для розрахунку параметрів забруднення атмосфери?
2. Яким чином можна врахувати клас стійкості атмосфери під час реалізації моделі дифузії викидів забруднювальних речовин?
3. Яким чином впливає інверсія на характер розсіювання забруднювальних речовин в атмосферному повітрі?
4. Як змінюється швидкість вітру з висотою?
5. Що уявляє собою приземний та пограничний шар атмосферного повітря?
6. Які метеорологічні параметри впливають на характер розсіювання забруднювальних речовин в атмосферному повітрі?
7. Від яких факторів залежить коефіцієнт вертикальної дифузії забруднювальних речовин?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Тема: моделювання процесу забруднення ріки при постійному скиданні стічних вод на основі моделі переносу домішок у водотоку.

Мета роботи: відтворити модель процесу забруднення ріки від промислових скидів за допомогою програмного середовища Mathcad.

Матеріали та обладнання: програмне середовище *PTC Mathcad* (або *Mathcad Prime*), форми статистичної звітності 2-тп (водгосп).

У результаті виконання роботи будуть сформовані наступні **результати навчання:**

- ❖ Застосовувати сучасне програмне забезпечення, що використовується для побудови моделей екологічних систем та процесів ;
- ❖ Використовувати форми статистичної звітності підприємств для формування бази даних стосовно джерел забруднення прилеглих до підприємств територій;
- ❖ Володіти методами оцінювання впливу промислових об'єктів на навколишнє середовище та наслідків інженерної діяльності на довкілля і пов'язану з цим відповідальність за прийняття рішень;
- ❖ Формувати вхідні дані до математичної моделі процесів забруднення навколишнього середовища на основі прикладних досліджень рівнів забруднення.

Постановка задачі

У канал з прямокутним перетином середньою шириною B і середньою глибиною h постійно скидаються стічні води на відстані b від берега. Витрата стічних вод дорівнює Q , концентрація забруднюючої речовини в них, в річці вище місця скидання.

Вважається, що процес переносу стаціонарний, витрата стічних вод незначна у порівнянні з витратою води в річці, а в результаті вертикального перемішування домішки її концентрацію можна осереднити по глибині.

Завдання роботи:

1. Відтворити моделі забруднення ріки скидами промислового підприємства у програмному середовищі *Mathcad*
2. Адаптувати модель для трапецієвидного та прямокутного русла ріки для імітації природних (річок) та штучних водойм (каналів)
3. Дослідити характери розподілу концентрацій забруднювальних речовин у водному середовищі за різних умов скиду та конфігурації русла.
4. Експортувати результати моделювання з *Mathcad* до *.pdf*.

Етапи побудови моделі забруднення ріки в програмному середовищі Mathcad

Заносимо вихідні дані через відповідні змінні до інтерфейсу програми для умов прямокутного устя, на основі прикладу, рис. 2.1.

Вхідні данні (прямокутний перетин):

Ширина ріки, м	$B := 20$
Похил водної поверхні (похил дна водотоку)	$I := 0.00001$
Коефіцієнт y , що залежить від коефіцієнту шорсткості n	$Y := 0.2$
Коефіцієнт шорсткості n	$n := 0.02$
Глибина річки, м	$H := 4$
Відстань від берегу до міста скиду, м	$b := 10$
Витрата стічних вод, м куб./с	$Q_0 := 2$
Концентрація забруднюючої речовини, г/л	$\phi_s := 20$
Фонова концентрація, г/л	$\phi_r := 0.0001$
Гранично допустима концентрація, г/л	$\phi_{ГДК} := 0.002$
Швидкість біохімічного окислювання органічних сполук K , $доб^{-1}$	$K := 0.01$
Довжина каналу, м	$L := 1000$

Рисунок 2.1 – Введення данні до моделювання (прямокутна форма устя)

Далі визначаємо необхідні величини, необхідні для основного рівняння дифузії забруднювальних речовин, рис. 2.2.

Розрахунок допоміжних величин:

Площа живого перетину, кв. м:

$$\omega := B \cdot H = 80$$

Змочений периметр χ , м:

$$\chi := B + 2 \cdot H = 28$$

Гідрравчліний радіус R, м

$$R := \frac{\omega}{\chi} = 2.857$$

Коефіцієнт Шезі за формулою Н.Н.Павловського:

$$C := \frac{R^Y}{n} = 61.682$$

Швидкість течії u , м/с:

$$u := C \cdot \sqrt{R \cdot I} = 0.33$$

Витрата води в річці Q_r , м.куб/с.

$$Q_r := \omega \cdot u = 26.376$$

Коефіцієнт поперечної дифузії, D_Y :

$$D_Y := \left(\frac{u \cdot H}{3524} \right) \cdot \left(\frac{B}{H} \right)^{1.378} = 3.438 \times 10^{-3}$$

Рисунок 2.2 – Розрахунок додаткових величин

Заносимо емпіричну залежність зміни концентрації забруднювальної речовини по мірі віддалення від місця скидання, рис. 2.3

Концентрація забруднюючої речовини ϕ на ділянці русла з координатами x, y :

$$\phi(x, y) := \phi_r + \frac{(\phi_s - \phi_r) \cdot Q_0}{H \cdot \sqrt{\pi \cdot u \cdot D_Y \cdot x}} \cdot \frac{e^{\left[-\frac{(y + 0.5B - b)^2 \cdot u}{4 \cdot D_Y \cdot x} - K \cdot \frac{x}{u} \right]}}{\operatorname{erf}\left(\frac{B \cdot \sqrt{u}}{2 \cdot \sqrt{D_Y \cdot x}} \right) + \operatorname{erf}\left[\frac{(B - b) \cdot \sqrt{u}}{2 \cdot \sqrt{D_Y \cdot x}} \right]}$$

Рисунок 2.3 – Емпірична модель зміни концентрації забруднювальної речовини в річці

де erf – інтеграл ймовірності (вбудована функція *Mathcad*)

Виводимо графіки зміни концентрацій забруднювальних речовин в вздовж лінії течії (X) та поперек русла річки (Y), рис. 2.4.

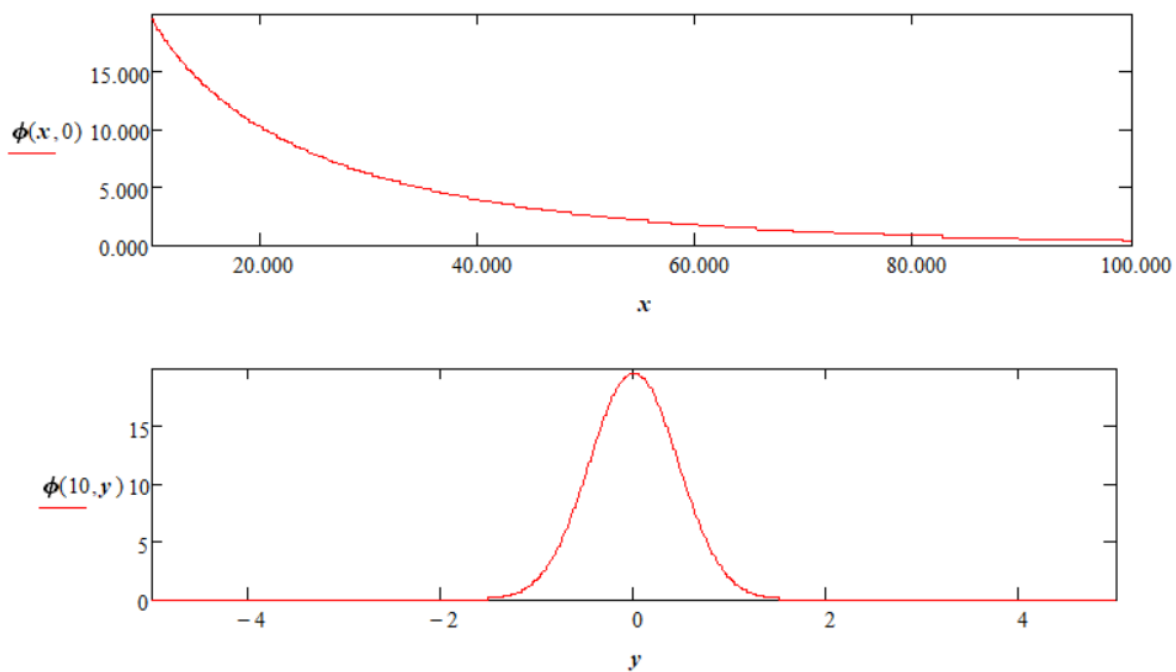


Рисунок 2.4 – Зміна концентрацій забруднювальних речовин

В даному випадку місце скидання стічних знаходиться у центрі системи координат $XY=(0, 0)$, для нижнього графіку взято відстань у 10 м від місця скидання стічних вод за течією $\phi(10, y)$.

Виводимо графік у системі координат, XY за допомогою інструментів для побудови двовимірного графіку, рис. 2.5.

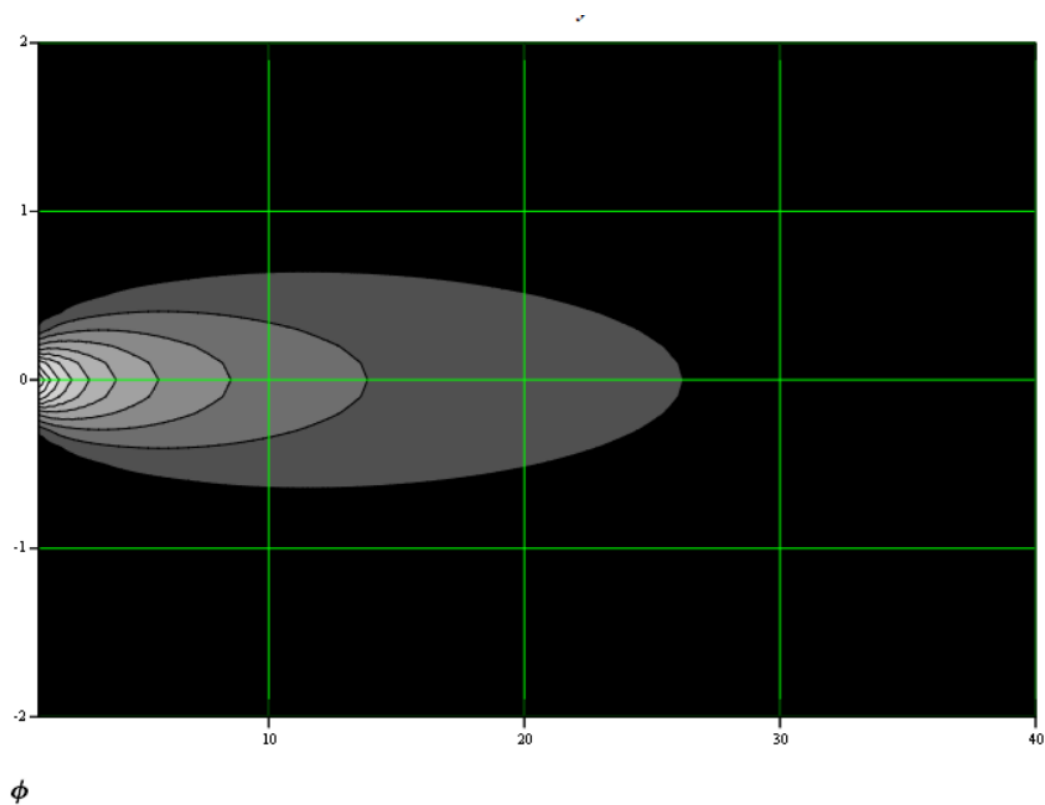


Рисунок 2.5 – Виведення графіку-плану концентрацій забруднювальних речовин в системі координат XY

Заносимо вихідні дані через відповідні змінні до інтерфейсу програми для умов трапецеїдального устя, на основі прикладу, рис. 2.6.

Вхідні дані (річка з трапецеїдальним перетином):

Ширина ріки, м	$B := 80$
Похил водної поверхні	$I := 0.00001$
Коефіцієнт y , що залежить від коефіцієнту шорсткості n	$Y := 0.4$
Коефіцієнт шорсткості n	$n := 0.05$
Глибина річки, м	$H := 5$
Відстань від берегу до міста скиду, м	$b := 40$
Витрата стічних вод, м куб./с	$Q_{st} := 2$
Концентрація забруднюючої речовини, г/л	$\phi_s := 20$
Фонова концентрація, г/л	$\phi_r := 0.0001$
Гранично допустима концентрація, г/л	$\phi_{ГДК} := 0.002$
Витратна характеристика рівномірного руху K , $доб^{-1}$	$K := 0.01$
Довжина річки, м	$L := 20000$
Кут нахилу берегів річки α , град.	$\alpha := 30$

Рисунок 2.6 – Введення данні до моделювання (трапецеїдальний перетин)

Визначаємо допоміжні величини для трапецеїдального перетину, рис. 2.7.

Розрахунок допоміжних величин:

Площа живого перетину, кв. м

$$\omega := (B + \cot(\alpha) \cdot H) \cdot H = 396.097$$

Змочений периметр χ , м

$$\chi := B + 2 \cdot H \cdot \sqrt{1 + \cot(\alpha)^2} = 90.121$$

Гідравчичний радіус R , м

$$R := \frac{\omega}{\chi} = 4.395$$

Коефіцієнт Шезі за формулою Н.Н.Павловського:

$$C := \frac{R^Y}{n} = 36.159$$

Швидкість течії u , м/с:

$$u := C \cdot \sqrt{R \cdot I} = 0.24$$

Витрата води в річці Q_r , м.куб/с.

$$Q_r := \omega \cdot u = 94.953$$

Коефіцієнт поперечної дифузії, D_y :

$$D_y := \left(\frac{u \cdot H}{3524} \right) \cdot \left(\frac{B}{H} \right)^{1.378} = 0.016$$

Рисунок 2.7 – Розрахунок додаткових величин

Заносимо модифіковану формулу для трапецеїдальної форми русла річки, рис. 2.8.

Концентрація забруднюючої речовини ϕ на ділянці русла з координатами x, y .

$$\phi(x, y) := \phi_r + \frac{(\phi_s - \phi_r) \cdot Q_0}{H \cdot \sqrt{\pi \cdot u \cdot D_Y \cdot x}} \cdot e^{\left[-\frac{(y + 0.5B - b)^2 \cdot u}{4 \cdot D_Y \cdot x} - K \cdot \frac{x}{u} \right]} \cdot \left[\operatorname{erf} \left(\frac{B \sqrt{u}}{2 \cdot \sqrt{D_Y \cdot x}} \right) + \operatorname{erf} \left[\frac{(B - b) \cdot \sqrt{u}}{2 \cdot \sqrt{D_Y \cdot x}} \right] \right]$$

Рисунок 2.8 – Модель для трапецеїдальної форми русла річки

Нижче моделі виводимо графіки зміни концентрацій забруднювальних речовин в вздовж лінії течії (X) та поперек русла річки (Y) а також графік-план для трапецеїдальної форми русла річки за прикладом як на рис. 2.4 та 2.5.

Контрольні запитання

8. Які фактори необхідно врахувати для моделювання забруднення річки промисловими скидами?
9. Яким чином можна врахувати форму русла річки для моделювання?
10. Який вид регресії є характерним для опису зміни концентрації забруднювальних речовин від місця скидів за течією?
11. Для чого задається глибина річки, якщо дана модель є двовимірною?
12. Як впливає швидкість течії річки на характер розподілу забруднюючих речовин за течією?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Тема: моделювання ставка-відстійника води, забрудненої зваженими твердими речовинами, та прогнозування осаду в ньому

Мета роботи: відтворити математичну модель накопичення осаду у ставку-відстійнику.

Матеріали та обладнання: *MS Excel*, технічна документація промислових очисних споруд.

У результаті виконання роботи будуть сформовані наступні **результати навчання:**

- ❖ Знати основні методологічні методи та математичний апарат до побудови певної моделі процесу у навколишньому середовищі;
- ❖ Формувати вхідні дані до математичної моделі процесів забруднення навколишнього середовища на основі прикладних досліджень рівнів забруднення.
- ❖ Використовувати результати математичного моделювання для оцінки змін параметрів навколишнього середовища.

Постановка задачі

Добовий обсяг води, що викачується із шахти становить Q , м³/доб. Загальна концентрація твердих речовин у ній становить C_1 , г/м³. Частина забрудненої води Q_1 , м³/доб, скидається у ставок-відстійник безпосередньо, а інша частина – Q_2 , м³/доб, перед скиданням у відстійник проходить попереднє очищення, причому після фільтрів концентрація забруднювачів у воді становить C_2 , г/м³.

Вода, що потрапила у відстійник, поступово освітлюється за рахунок випадання забруднювачів в осад, щільність якого після тривалого ущільнення становить P , г/м³. Концентрація твердих речовин у ній стає рівної C , г/м³.

Завдання роботи:

1. Побудувати модель ставка-відстійника по фактору твердого осаду в ньому, використовуючи схему, наведену в методичних вказівках (дозволяється використання пакета MS Excel);
2. Задати часовий ряд нагромадження твердого осаду на 5 років (підібрати шляхом довільного варіювання параметрів, що впливають на величину осаду);
3. Обчислити експонентні середні значення по моделі нульового порядку й дати прогноз на 6-ий рік. Розрахувати точність прогнозу (використати пакет MS Excel);
4. Проаналізувати часовий ряд нагромадження твердого осаду й підібрати найбільш підходящий тренд для прогнозування річного обсягу осаду на 6 й 7 рік. Для обраного тренду визначити рівняння й величину апроксимації (R^2) (використати пакет MS Excel);
5. Запропонувати інженерні рекомендації зі зниження осаду у відстійнику.

Вихідні данні до моделювання ставка-відстійника наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані до моделювання

Назва	Літерне позначення у формулах	Числове значення	Од. виміру
Номер варіанту	N	10	-
Добовий обсяг води із шахти	Q	30	м ³ /доб
Добовий обсяг води, що надходить у відстійник безпосередньо з шахти	Q ₁	8	м ³ /доб
Загальна концентрація твердих речовин у не фільтрованій шахтній воді	C ₁	2500	г/м ³
Загальна концентрація твердих речовин у фільтрованій шахтній воді	C ₂	80	г/м ³
Щільність осаду у відстійнику після тривалого ущільнення	P	2000000	г/м ³

Методичні рекомендації до моделювання ставка-відстійника

Використаємо наступну схему моделі, рис. 1:

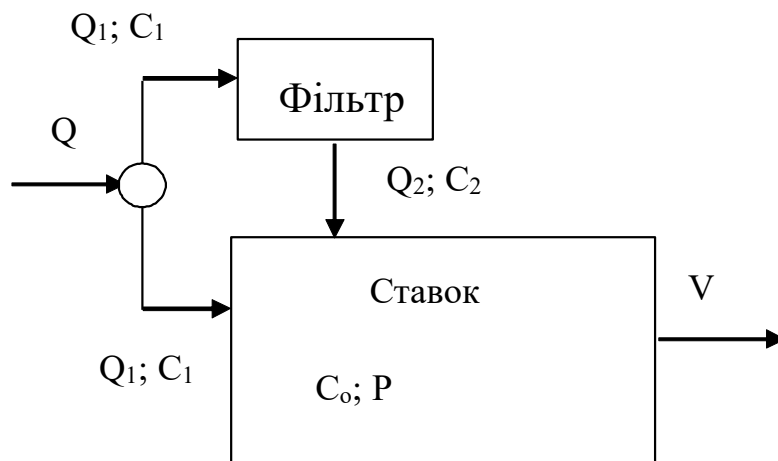


Рисунок 3.1 – Схема моделі відстійника

Ця схема дозволяє побудувати математичну модель відстійника, що описує залежність річного обсягу осаду в ньому від обсягів вступника в нього води й концентрації забруднювачів за формулою (3.1):

$$V = 365 \cdot \frac{C_0 \cdot Q_1 + C_0 \cdot Q_2}{P}, [\text{м}^3], \quad (3.1)$$

Тут C_1 , C_2 , і C – відповідно концентрації речовин у вихідній, профільтрованій і проясненій воді, які на період між контрольними вимірами можна вважати постійними;

P – концентрація твердої фази осаду у відстійнику після тривалого ущільнення, г/м^3 .

Концентрацію речовин у відстійнику C_0 обчислюємо по формулі (3.2):

$$C_0 = \frac{K_1 \cdot C_1}{100} + \frac{K_2 \cdot C_2}{100}, [\text{г/м}^3], \quad (3.2)$$

Де Q_2 – обсяг води, що надходить на очищення у відстійник через фільтри. Очевидно, що він визначається по наступній формулі (3.3):

$$Q_2 = Q - Q_1, [\text{м}^3/\text{доб.}], \quad (3.3)$$

K_1 і K_2 – відсоток змісту обсягу не фільтрованої й фільтрованої води у відстійнику, що визначається відповідно по формулах (3.4):

$$K_1 = Q_1 \cdot 100 / Q, [\%], \quad (3.4)$$

$$K_2 = Q_2 \cdot 100 / Q, [\%], \quad (3.5)$$

Очевидно, що модель лінійна по параметрах Q_1 й Q_2 при постійних інших.

Прогнозування методом експонентного згладжування

При прогнозі *методом експонентного згладжування* враховується ступінь впливу кожної крапки вихідного тимчасового ряду на прогнозовану. Очевидно, що в багатьох випадках останні крапки передісторії мають значно більший вплив на прогноз, чим перші. Останній факт і враховує метод експонентного згладжування.

Сутність методу полягає в згладжуванні тимчасового ряду за допомогою зваженої ковзної середньої, у якій ваги спостережень підкоряються експонентному закону ймовірності.

Рекурентна формула Р. Брауна для визначення експонентної середньої нульового порядку має вигляд (3.6):

$$S_t = \alpha \cdot y_t + \beta \cdot S_{t-1} \quad (3.6)$$

де $\beta = 1 - \alpha$, α – безрозмірний параметр згладжування, що перебуває в межах від 0 до 1. Це дозволяє управляти впливом точок тимчасового ряду на прогнозовану: від рівного – при 0, до обліку впливу тільки останньої крапки – при 1 і визначається по формулі 3.7:

$$\alpha = \frac{2}{t + T_p}, \quad (3.7)$$

Тут t – кількість років тимчасового ряду, T_p – кількість років, на яке дається прогноз.

Відповідно до цієї моделі одержимо тренд, початкова крапка якого дорівнює середньому значенню передісторії (3.8):

$$S_0^1 = \frac{\sum_{t=1}^t y_t}{t}, \quad (3.8)$$

А прогнозне значення оцінюється величиною (3.9):

$$\tilde{y}_{t+\tau} = S_t^{[1]}, \quad (3.9)$$

Таким чином, останнє значення, обчислене по рекурентній моделі нульового порядку, чисельно дорівнює прогнозу на наступний дискретний момент часу.

Точність прогнозу оцінюють по наступній формулі (3.10):

$$\delta_{t+\tau} = \left[\frac{S_0^1 - y_{t+\tau}}{S_0^1} \right] \cdot 100 \% \quad (3.10)$$

Рекомендації щодо вибору лінії тренду до прогнозування

Для вибору лінії тренду, прогнозування значень на кілька тимчасових інтервалів, визначення рівняння тренду й розрахунку його апроксимації рекомендується використати пакет *MS Excel*.

Лінії тренду дозволяють графічно відображати тенденції даних і прогнозувати їхні подальші зміни. Подібний аналіз називається також **регресійним** аналізом. Використовуючи регресійний аналіз, можна продовжити лінію тренду в діаграмі за межі реальних даних для пророкування майбутніх значень.

Існує п'ять різних видів ліній тренду (апроксимація й згладжування), які можуть бути додані на діаграму Microsoft Excel. Спосіб варто **вибирати** залежно від типу даних:

- ❖ Лінійна апроксимація — це пряма лінія, що щонайкраще описує набір даних. Вона застосовується в найпростіших випадках, коли крапки даних розташовані близько до прямої. Говорячи інакше кажучи, лінійна апроксимація гарна для величини, що збільшується або убуває з постійною швидкістю.

- ❖ Логарифмічна апроксимація корисна для опису величини, що спочатку швидко росте або убуває, а потім поступово стабілізується. Логарифмічна апроксимація використає як негативні, так і позитивні величини.

- ❖ Поліноміальна апроксимація використається для опису величин, що поперемінно зростають й убувають. Вона корисна, наприклад, для аналізу великого набору даних про нестабільну величину. Ступінь полінома визначається кількістю екстремумів (максимумів і мінімумів) кривої. Полином другого ступеня може описати тільки один максимум або мінімум. Полином третього ступеня має один або два екстремуму. Полином четвертого ступеня може мати не більше трьох екстремуму.

- ❖ Статечна апроксимація корисна для опису монотонно зростаючої або монотонно убутної величини, наприклад відстані, пройденого автомобілем, що розганяє. Використання статечної апроксимації неможливо, якщо дані містять нульові або негативні значення.

- ❖ Експонентна апроксимація корисна в тому випадку, якщо швидкість зміни даних безупинно зростає. Однак для даних, які містять нульові або негативні значення, цей вид наближення не застосуємо.

Точність апроксимації. Лінія тренду найбільшою мірою наближається до представленого на **діаграмі** залежності, якщо значення R-квадрат дорівнює або близько до 1. При апроксимації даних за допомогою лінії тренду значення R-квадрат розраховується автоматично. Отриманий результат можна вивести на діаграмі.

Результатів розрахунків та висновки (приклад розрахунку)

1. Побудова моделі відстійника виконуємо на основі вищевикладених рекомендацій. Розрахунок річного обсягу осаду й допоміжних величин виконуємо в програмі MS Excel та надсилаємо на корпоративну пошту файл «*модель відстійника.xls*». Приклад результатів розрахунку, скопійовані з файлу, наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані й розрахунок річного обсягу осаду

Назва	Літерне позначення у формулах	Числове значення	Од. виміру
Добовий обсяг води, що викачується	$Q=$	30	м. куб
Концентрація твердих речовин у неочищеній воді	$C1=$	2500	г/м. куб
Обсяг не фільтрованої води	$Q1=$	8	м. куб
Обсяг фільтрованої води	$Q2=$	22	м. куб
Концентрація твердих речовин у фільтрованій воді	$C2=$	80	г/м. куб
Щільність осаду у відстійнику	$P=$	2000000	г/м. куб
Зміст не фільтрованої води у відстійнику	$K1=$	26,667	%
Зміст фільтрованої води у відстійнику	$K2=$	73,333	%
Концентрація твердих речовин у воді відстійника	$C=$	725,333	г/м. куб
Річний обсяг осаду	$V=$	3,971	м. куб/рік

2. Задаємо часовий ряд нагромадження твердого осаду на 5 років, шляхом довільної зміни параметрів, що впливають на обсяг осаду у відстійнику. Модель відстійника, побудована в MS Excel, дозволяє наочно стежити за зміною річного обсягу осаду при зміні яких-небудь вихідних даних. Таким чином, довільно змінюючи вихідні дані, одержуємо наступний часовий ряд річного обсягу осаду за 5 років, табл. 3.3:

Таблиця 3.3 – Часовий ряд річного обсягу осаду

Позначення	Рік					Од. виміру
	1	2	3	4	5	
$Q=$	30	30	30	30	30	м. куб
$C1=$	2500	2550	2500	2500	2500	г/м. куб
$Q1=$	8	16	15	12	10	м. куб
$Q2=$	22	14	15	18	20	м. куб
$C2=$	80	80	80	80	100	г/м. куб
$p=$	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	г/м. куб
$K1=$	26,667	53,333	50,000	40,000	33,333	%
$K2=$	73,333	46,667	50,000	60,000	66,667	%
$C=$	725,333	1397,333	1290,000	1048,000	900,000	г/м. куб
$V=$	3,971	7,650	7,063	5,738	4,928	м. куб/рік

3. Обчислюємо експонентні середні значення по моделі нульового порядку. Відповідно до вищевикладеної методики визначаємо й скориставшись

пакетом MS Excel обчислюємо: коефіцієнти згладжування α і β , початкове значення експонентної середньої S_0 , експонентні середні з S_1 по S_5 . Даємо прогноз на шостий рік, що відповідно до методики, дорівнює п'ятій експонентної середньої (S_5), табл. 3.4

Таблиця 3.4 – Прогноз осаду на 6-й рік методом експонентного згладжування

Шуканий параметр	Значення	Од. вим.
Кількість років спостереження $t=$	5	років
Кількість прогнозованого років $T_p=$	1	років
Параметр згладжування $\alpha=2/(t+T_p)=$	0,33	-
Параметр згладжування $\beta=1-\alpha=$	0,67	-
Початкове значення експонентної середньої $S_0=\sum V/t=$	5,87	м ³ /рік
Перша експонентна середня $S_1=\alpha*V_1+\beta*S_0=$	5,24	м ³ /рік
Друга експонентна середня $S_2=\alpha*V_2+\beta*S_1=$	6,04	м ³ /рік
Третя експонентна середня $S_3=\alpha*V_3+\beta*S_2=$	6,38	м ³ /рік
Четверта експонентна середня $S_4=\alpha*V_4+\beta*S_3=$	6,17	м ³ /рік
П'ята експонентна середня $S_5=\alpha*V_5+\beta*S_4=$	5,75	м ³ /рік
Прогноз обсягу осаду на 6-й рік ($=S_5$)	5,75	м ³ /рік
Погрішність $\sigma=$	-1,98	%

Отже, згідно із прогнозом на основі методу експонентного згладжування на 6-й рік прогнозується обсяг осаду у відстійнику 5,75 м³/рік, при погрішності прогнозу $\sigma=-1,98\%$. Для наочного зображення тимчасового ряду обсягу осаду й результату прогнозування методом експонентного згладжування будемо графік (рис 3.2).

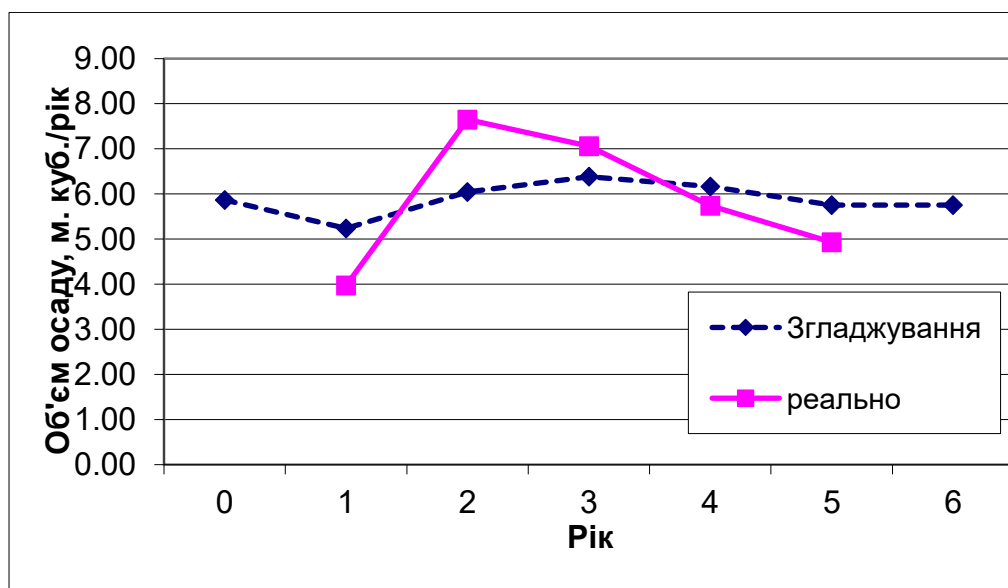


Рисунок 3.2 – Обсяг осаду: реальний і прогнозований методом згладжування

Як бачимо на рис. 3.2 зображені реальні значення осаду за 5 років й експонентні середні. На графіку зображене також початкове значення експонентної середньої S_0 – крапка передісторії. Достоїнством даного методу прогнозування є те, що він ураховує ступінь впливу кожної крапки на прогноз, тобто останні значення тимчасового ряду впливають на прогнозоване значення сильніше, ніж перші. Однак даним методом можна дати прогноз лише на 1 часовий інтервал.

4. Для того щоб дати прогноз більш ніж на один тимчасовий інтервал, необхідно проаналізувати часовий ряд і підібрати до нього найбільш підходящий тренд. У цьому випадку для прогнозування значень найбільш підходящим є поліноміальний тренд, оскільки реальні значення обсягу осаду поперемінно зростають й убують, утворюючи при цьому екстремуми (див. рис. 3.2). Число цих екстремумів (у цьому випадку 3) і визначає порядок рівняння для поліноміального тренду. Далі за допомогою пакета MS Excel даємо прогноз річного обсягу осаду на 6 й 7 рік на основі поліноміального тренду (рис. 3.3.)

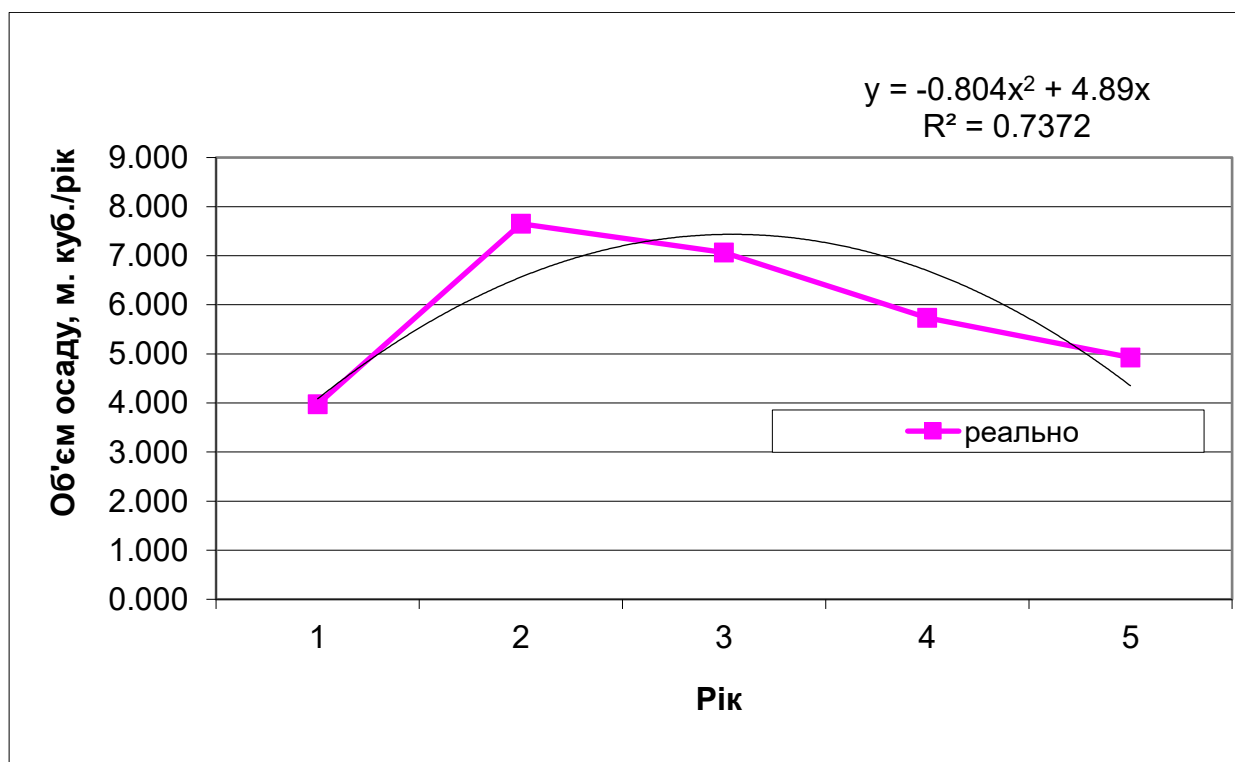


Рисунок 3.3 – Прогнозування річного обсягу осаду на 6 й 7 рік

Отже, прогнозування осаду відповідно до поліноміального тренду буде виражатися у вигляді рівняння третього порядку: $y = -0,804 x^2 + 4,89 x$, з точністю апроксимації $R^2=0,737$. У цьому випадку точність апроксимації для поліноміального тренду вище, ніж для інших трендів, доступних у пакеті MS Excel. Однак це значення апроксимації занадто мале, щоб довіряти даному прогнозу.

Як показує практика, при більшому тимчасовому ряду (10–12 значенні), точність прогнозу на основі даного тренду була б вище.

5. Як бачимо, дана модель відстійника має багато параметрів, від яких залежить річний обсяг осаду. Для зниження цього обсягу необхідно:

- ❖ Зменшити кількість води, що надходить у відстійник, минаючи систему очищення;

- ❖ Збільшити ефективність очищення шахтної води в системі фільтрації.

Контрольні запитання

1. Які види трендів та регресійні моделі використовуються для прогнозування і згладжування часових рядів?

2. У чому перевага методу експонентного згладжування даних?

3. Яким чином можна визначити точність прогнозування?

4. Яким чином можна обґрунтувати вибір певної регресійної моделі для опису динаміки даних та прогнозування?

5. Що уявляє собою коефіцієнт детермінації регресійної моделі та яким чином визначається?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

Тема: моделювання хімічного забруднення ґрунтів важкими металами

Мета роботи: навчитися використовувати математичні моделі для просторової інтерполяції важких металів в ґрунті.

Матеріали та обладнання: MS Excel, результати лабораторних досліджень про вміст хімічних речовин у ґрунтах.

У результаті виконання роботи будуть сформовані наступні **результати навчання:**

- ❖ Знати основні методологічні методи та математичний апарат до побудови певної моделі процесу у навколишньому середовищі;

- ❖ Розуміти суть основних інструментів, що застосовують для обробки екологічних даних ;

- ❖ Використовувати результати математичного моделювання для оцінки змін параметрів навколишнього середовища

Теоретична частина

Основними джерелами хімічного забруднення ґрунтів є хімічні речовини, які використовуються в сільському господарстві (пестициди, отрутохімікати та ін.), атмосферні опади в радіусі дії промислових підприємств (особливо хімічних і металургійних); видобування корисних копалин; теплові і атомні електростанції; мінеральні добрива.

Значна частина джерел забруднення ґрунтів справляє локальну дію, але деякі з них діють у регіональному й навіть у глобальному масштабі, особливо в разі забруднення через атмосферні опади або внаслідок використання добрив на значних площах.

Хімічне забруднення ґрунтів відбувається переважно двома шляхами:

- ❖ поглинанням верхнім шаром ґрунту викидів промислових джерел в атмосферу;
- ❖ безпосереднім внесенням хімічних речовин у вигляді меліорантів, добрив, пестицидів, гербіцидів.

За даними про ступінь і характер забруднення ґрунту в районі шламонакопичувачів і териконів одержано моделі розрахунку деяких хімічних елементів у поверхневому (0 ... 20 см) горизонті ґрунту, а саме для (4.1–4.4):

Міді:

$$C = 0,004R^2 + 2(C_0/100)R + (C_0 - 0,8) \quad (4.1)$$

Цинку:

$$C = 0,01R^2 + 0,6R + 0,9C_0 \quad (4.2)$$

Хрому:

$$C = 0,02R^2 + 1,2R + 0,9C_0 \quad (4.3)$$

Нікелю:

$$C = 0,02R^2 + C_0R/100 + 0,9C_0 \quad (4.4)$$

де R — відстань від шламонакопичувачів ($r \leq 500$ м);

C_0 — початкове значення хімічних елементів у ґрунті, мг/кг.

Завдання до виконання роботи:

1. Побудувати моделі забруднення ґрунту на основі емпіричних залежностей (1–5) за допомогою програми *Mathcad* або *Excel*
2. Розрахувати концентрації хімічних елементів в ґрунті на різних відстанях від шламонакопичувача та подати дані розрахунку відповідно до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати розрахунку хімічних елементів

Відстань, м	Мідь, мг/кг	Цинк, мг/кг	Хром, мг/кг	Нікель, мг/кг
50				
100				
150				
200				
250				
300				
350				
400				
450				
500				

3. Унаочнити результати таблиці 4.1 у вигляді графіків зміни концентрації хімічних елементів у ґрунтах від відстані до джерела забруднення.

4. Визначити графічно зону поширення небезпечного впливу шламонакопичувача на прилеглі ґрунти (шляхом порівняння розрахункових концентрацій хімічних елементів з їх ГДК).

5. На основі результатів моделювання узагальнено охарактеризувати небезпеку для екологічних систем на прилеглих до зони забруднення територіях.

Вхідні дані до розрахунків:

Початкові значення концентрацій хімічних елементів у ґрунтах біля джерела забруднення визначаються за формулами:

Для міді: $50 + 5N_{var}$

Для цинку: $100 + 10N_{var}$

Для хрому: $100 + 10N_{var}$

Для нікелю: $80 + 5N_{var}$

Де N_{var} – номер варіанта студента в журналі академічної групи

Граничнодопустимі концентрації хімічних елементів у ґрунтах становлять:

Для міді: 55 мг/кг

Для цинку: 100 мг/кг

Для хрому: 100 мг/кг

Для нікелю: 85 мг/кг

Контрольні запитання

1. В чому полягає екологічна небезпека від забруднення ґрунтів важкими металами.

2. В чому полягає специфіка забруднення ґрунтів різними металами та яким чином можна її врахувати під час моделювання.

3. Який тип математичних моделей доцільно застосовувати для просторової інтерполяції даних про вміст концентрацій забруднюючих речовин у ґрунтах.

4. Які основні джерела забруднення ґрунту?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Тема: прогнозування численності популяції видів в екосистемі на основі моделі Лоткі-Вольтера «Хижак-Жертва»

Мета роботи: дослідити динаміку чисельності популяції двох видів у системі «Хижак-Жертва» шляхом розв'язання системи диференціальних рівнянь в програмному середовищі *Mathcad*.

Матеріали та обладнання: програмне середовище *PTC Mathcad*.

У результаті виконання роботи будуть сформовані наступні **результати навчання:**

- ❖ Знати основні методологічні методи та математичний апарат до побудови певної моделі процесу у навколишньому середовищі;
- ❖ Розуміти суть основних інструментів, що застосовують для обробки екологічних даних;
- ❖ Застосовувати сучасне програмне забезпечення, що використовується для побудови моделей екологічних систем та процесів.

Завдання роботи:

1. Побудувати модель «Хижак-Жертва» у програмному середовищі Mathcad за наведеними рекомендаціями
2. Дослідити динаміку чисельності популяцій обох видів за різних початкових умов та параметрів моделі.

Теоретична частина

В природоохоронній діяльності та ресурсозбереженні часто виникає задача в дослідженні змін видового різноманіття на територіях впливу промислових комплексів, зокрема підчас процедур з ОВД та СЕО. Тому важливим є моніторинг видового різноманіття і аналіз чисельності представників певної популяції, оскільки зникнення одного виду може призвести до непередбачуваних наслідків для усієї екосистеми регіону.

Популяційна динаміка – дослідження змін розміру популяцій, їх склад за віком та іншими ознаками, взаємодії між популяціями, та біологічних і екологічних процесів, що впливають на ці зміни. Хоча терміни «популяційна динаміка» і «популяційна біологія» часто використовуються рівнозначно, перший стосується строго математичного підходу, а другий – ширшої галузі, що включає й експериментальне отримання даних для аналізу.

Рівняння Лотки – Вольтери або рівняння хижак-жертва – система двох звичайних диференціальних рівнянь першого порядку, яка описує кінетику чисельності популяції з одним типом хижаків і одним типом жертв. Характерною особливістю рівнянь є те, що їхнім розв'язкам є автоколивання. Рівняння запропонували незалежно Альфред Джеймс Лотка та Віто Вольтера.

Система диференціальних рівнянь мають наступний вигляд (5.1):

$$\frac{dx}{dt} = x \cdot (\alpha - \beta \cdot y) \quad \frac{dy}{dt} = -y \cdot (\gamma - \delta \cdot x) \quad (5.1)$$

Рисунок 1 – Загальний вигляд системи рівнянь

де x – кількість жертв, наприклад, зайців на поточний період часу;
 y – кількість хижаків, наприклад, вовків на поточний період часу;
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – параметри системи.

У рівняння входять такі процеси: розмноження жертв та їхня гибель в результаті поїдання хижаками, розмноження та вимирання хижаків. Вважається,

що розмноження хижаків пропорційне кількості їжі, тобто, кількості потенційних жертв у популяції.

Система рівнянь має дві стаціонарні точки:

1. $x = 0, y = 0$ – ця точка відповідає відсутності в популяції як жертв, так і хижаків.

2. $x = \gamma / \delta, y = \alpha / \beta$

Аналіз стійкості стаціонарних точок показує, що перша з них (нульова) є сідловою, а друга – фокусом. Показник Ляпунова для фокуса чисто уявний, тому з лінійного аналізу зробити висновок про стійкість чи нестійкість фокуса неможливо. Однак для рівнянь Лотки-Вольтера існує інтеграл руху, який показує, що фазові траєкторії – замкнуті криві, всередині яких знаходиться фокус.

Для розв’язання рівняння Лотки-Вольтера існує інтеграл руху (5.2):

$$y^{\alpha} e^{-\beta y} x^{\gamma} e^{-\delta x} = \text{const.} \quad (5.2)$$

Типові фазові траєкторії показані на малюнку праворуч. При значному розмноженні жертв створюються умови для розмноження хижаків завдяки доступності їжі. Але розмноження хижаків призводить до зменшення числа жертв. Коли число жертв сильно падає, хижаки теж гинуть через недостатню кількість їжі. Тільки тоді, коли кількість хижаків досягає мінімуму, популяція жертв знову починає зростати.

Існування інтегралу руху призводить до того, що величини популяцій визначаються початковими умовами. В цій задачі немає граничного циклу, який був би атрактором для фазових траєкторій. Цикли в задачі хижак-жертва мають байдужу стійкість. Модель Лотки-Вольтера може бути узагальнена для багатьох популяцій. Для них ми маємо такі рівняння, рис. 5.1:

$$\frac{dy_i}{dt} = \left(\sum_{j=1}^N c_{ij} \cdot x_j - d_i \right) \cdot y_i$$

Рисунок 5.1 – Узагальнений вигляд моделі для багатьох популяцій

де параметри a_i, b_{ij}, c_{ij}, d_i мають такий же сенс як у моделі із двома видами організмів.

Практична реалізація системи рівнянь «Хижак-Жертва» в програмному середовищі Mathcad

Задаємо вихідні дані для побудови моделі, рис. 5.2.

Модель Лоткі-Вольтера "Хижак-жертва"

Номер варіанту:	$N_{\text{вар}} := 10$
Швидкість розмноження жертв	$\alpha := 1 + 0.05 \cdot N_{\text{вар}} = 1.5$
Вірогідність вбивства жертви хижаком під час їх зустрічі	$\beta := 0.2 + 0.01 \cdot N_{\text{вар}} = 0.3$
Смертність хижаків	$\gamma := 2 + 0.02 \cdot N_{\text{вар}} = 2.2$
Швидкість розмноження хижаків (за умов існування жертв)	$\delta := 0.1$

Рисунок 5.2 – Введення вхідних даних до моделювання

Вводимо основну модель та вказуємо її параметри до розрахунку чисельності популяцій, рис. 5.3

$$F1(t, y) := \begin{pmatrix} \alpha \cdot y_0 - \beta \cdot y_0 \cdot y_1 \\ -\gamma \cdot y_1 + \delta \cdot y_0 \cdot y_1 \end{pmatrix} \quad \text{Загальний вигляд моделі}$$

$M := 1000$	Кількість ітерацій для розрахунку значень від t_0 до t_1
$t_0 := 0$	Початковий період розрахунку
$t_1 := 100$	Завершальний період розрахунку

Рисунок 5.3 – Введення моделі та параметрів до прогнозування

Наводимо умови та критерії для сталого функціонування системи хижак-жертва, рис. 5.4

Знаходимо кількість жертв та хижаків за якою система буде стаціонарною (спійкою):

$$\begin{aligned} \text{Кількість жертв} \quad y_{0st} &:= \frac{\gamma}{\delta} = 22 \\ \text{Кількість хижаків} \quad y_{1st} &:= \frac{\alpha}{\beta} = 5 \end{aligned}$$

Рисунок 5.4 – Налаштування параметрів стаціонарної системи

Використовуємо функцію *rkfixed* (метод Рунге-Кутти) для розв'язання системи диференціальних рівнянь, рис. 5.5

$D1 := \text{rkfixed}\left[\begin{pmatrix} 12 \\ 16 \end{pmatrix}, t0, t1, M, F1\right]$	Задаємо початкові умови, коли кількість хижаків перевищує чисельність жертв
$D2 := \text{rkfixed}\left[\begin{pmatrix} 12 \\ 12 \end{pmatrix}, t0, t1, M, F1\right]$	Задаємо початкові умови, коли кількість жертв дорівнює кількості хижаків
$D3 := \text{rkfixed}\left[\begin{pmatrix} 12 \\ 8 \end{pmatrix}, t0, t1, M, F1\right]$	Задаємо початкові умови, коли кількість жертв більша за кількість хижаків
$Dst := \text{rkfixed}\left[\begin{pmatrix} y_{0st} \\ y_{1st} \end{pmatrix}, t0, t1, M, F1\right]$	Для стаціонарної моделі

Рисунок 5.5 – Розв’язання системи диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутти

Відображаємо результати розрахунків у вигляді графіків динаміки чисельності популяції двох видів за різних початкових умов співвідношення чисельності, рис. 5.6 – 5.9

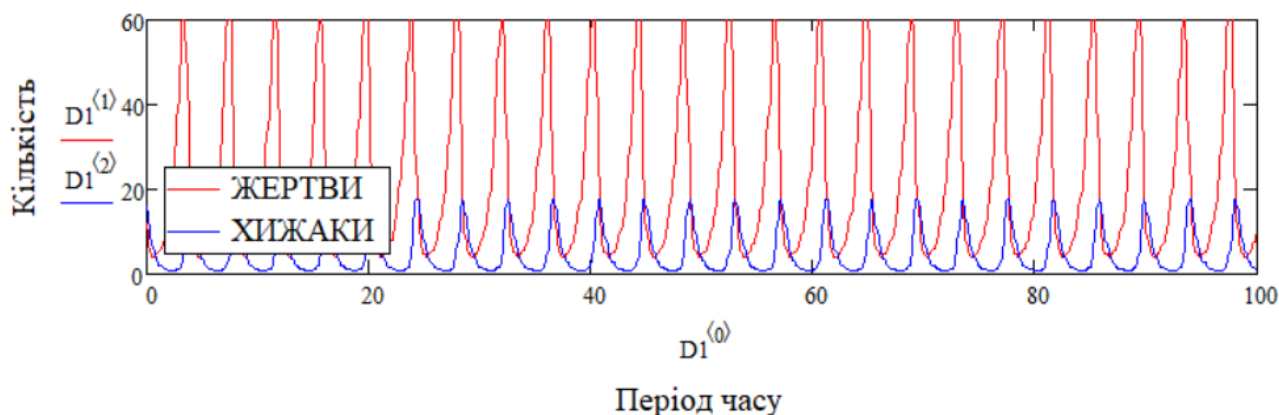


Рисунок 5.6 – Динаміка чисельності популяцій «Хижак-Жертва» за умов коли кількість хижаків більша за кількості жертв

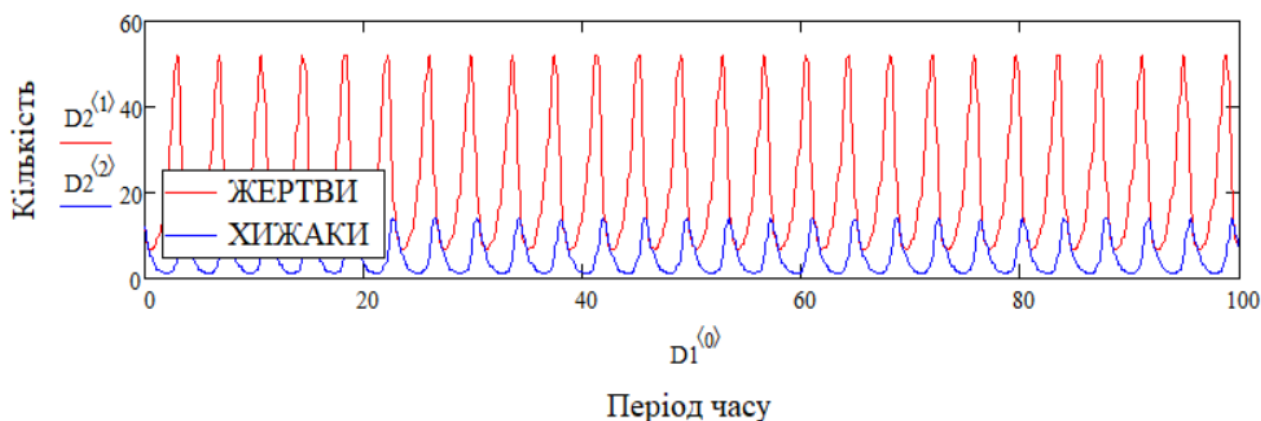


Рисунок 5.7 – Динаміка чисельності популяцій «Хижак-Жертва» за умов коли кількість хижаків дорівнює за кількості жертв

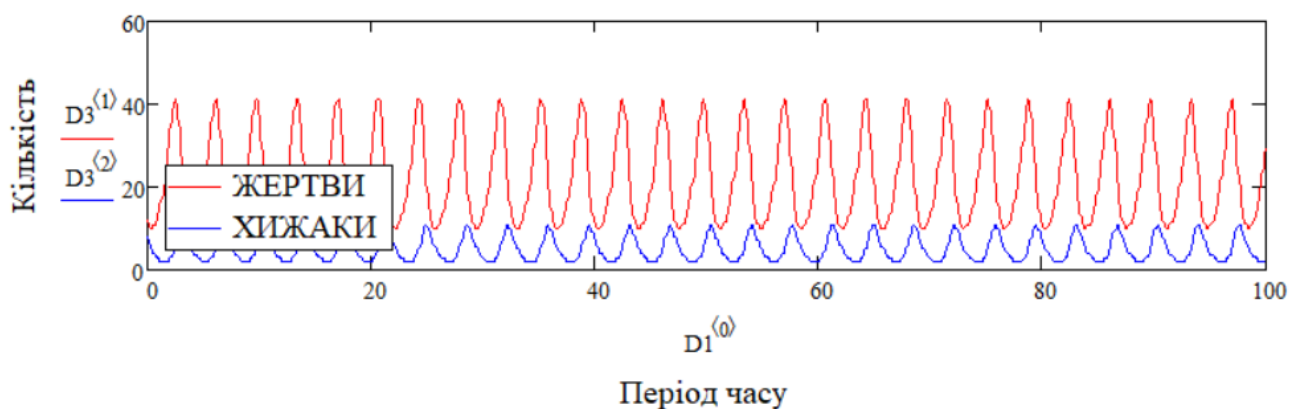


Рисунок 5.8 – Динаміка чисельності популяцій «Хижак-Жертва» за умов коли кількість хижаків менше за кількості жертв

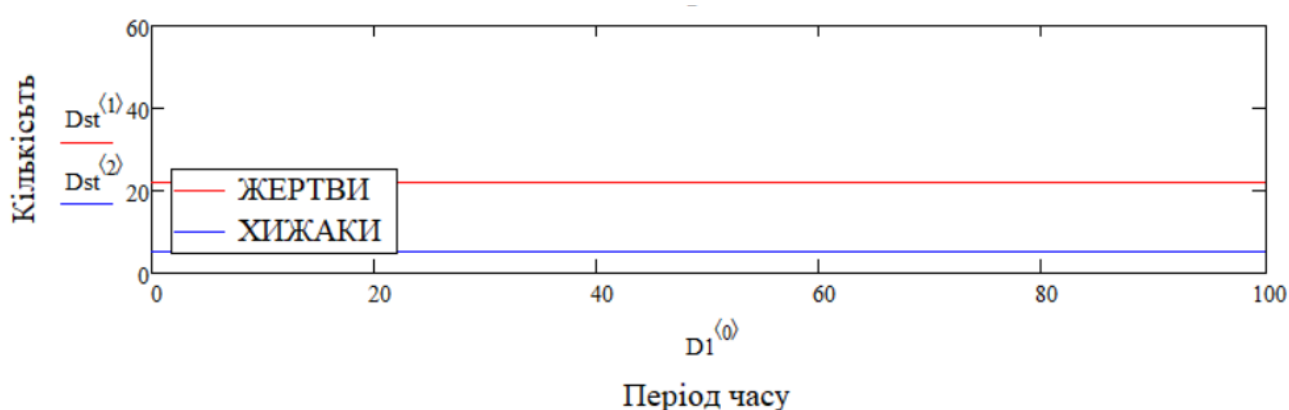


Рисунок 5.9 – Динаміка чисельності популяцій «Хижак-Жертва» за умов сталої системи (гомеостазу)

За умов гомеостазу фактор часу нівелюється, що робить систему стаціонарною.

Далі засобами Mathcad будуюмо фазовий графік «Хижак-Жертва» за наведених вище умов та параметрів, рис. 5.10.

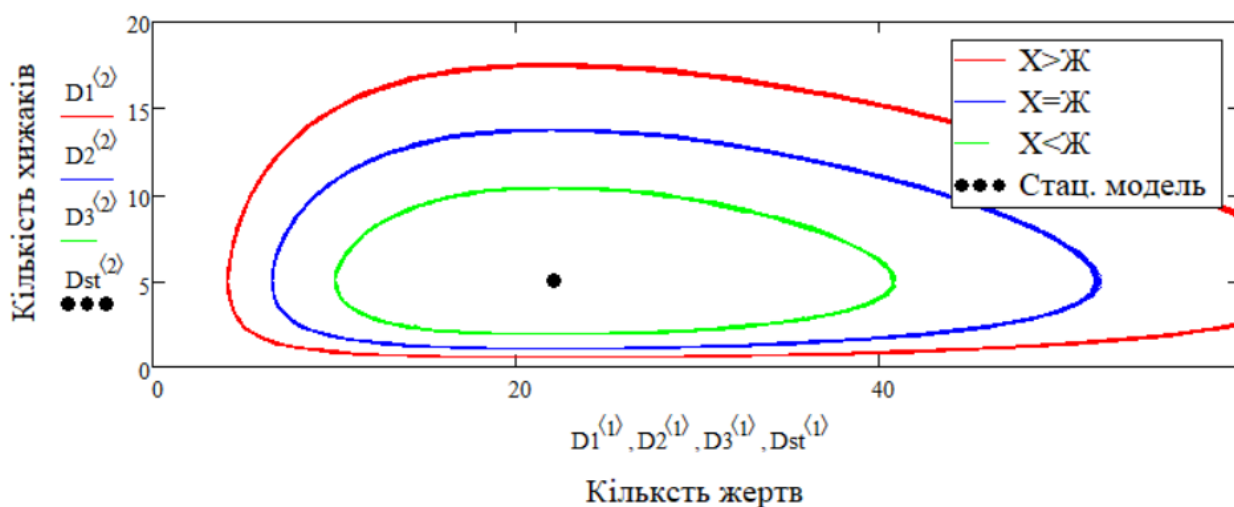


Рисунок 5.10 – Фазовий графік моделі «Хижак-Жертва»

На фазовому графіку чисельність видів відображається на вісях в системі координат X та Y .

Контрольні запитання

1. Які параметри впливають на зміну чисельності популяцій в моделі «Хижак-Жертва»?
2. Який метод в програмі Mathcad дозволяє розв'язати диференціальну систему рівнянь до моделі «Хижак-Жертва»?
3. Як виглядає стаціонарна система на фазовому графіку моделі «Хижак-Жертва»?
4. Наведіть приклади негативних наслідків для екосистеми при зникненні одного з видів?
5. Поясніть суть роботи моделі «Хижак-Жертва»?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Тема: геоінформаційний аналіз рівня забруднення атмосфери промислових міст на основі інструментів інтерполяції, класифікації та зональної статистики.

Мета роботи: дослідити небезпеку для здоров'я населення від викидів промислового підприємства за допомогою ГІС-технологій.

Матеріали та обладнання: програмне середовище *ESRI ArcGIS Desktop* або *QGIS*, набори геопросторових даних до ГІС.

У результаті виконання роботи будуть сформовані наступні **результати навчання:**

- ❖ Розуміти суть основних інструментів, що застосовують для обробки екологічних даних .
- ❖ Застосовувати сучасне програмне забезпечення, що використовується для побудови моделей екологічних систем та процесів ;
- ❖ Формувати дані для характеристики екологічного стану території на основі виконаних прикладних досліджень .
- ❖ Планувати і проводити прикладні дослідження з проблем впливу промислових об'єктів на навколишнє середовище ;
- ❖ Використовувати результати математичного моделювання для оцінки змін параметрів навколишнього середовища.

Завдання роботи:

1. Із відкритих джерел заформувати просторово-розподілену базу даних, що містить значення про концентрації забруднювальних речовин в атмосферному повітрі на постах спостереження, результатів моделювання тощо (на прикладі м. Дніпро або Кам'янське);
2. Представити дані у вигляді точкового шару геоінформаційної системи за допомогою програмного середовища *ArcGIS* або *QGIS*;
3. Провести моделювання вихідних даних шляхом просторової інтерполяції із використанням методів найближчого сусідства та

зворотно-зважених відстаней для формування растру градієнту концентрацій забруднювальних речовин на дослідженій території;

4. Підключити до проєкту векторний шар що містить контури адміністративних районів міста з кількістю населення та визначити засобами зональної статистики найменші, середні та назвищі концентрації для кожного адміністративного району.

5. Провести класифікацію растру приземних концентрацій за 4–6 рівнями небезпеки та визначити за допомогою інструменту *Tabulate Area* площі кожного класу за адміністративними районами і відповідною кількістю населення. Результати аналізу представити у вигляді таблиць.

Теоретична система – опис основних інструментів в ГІС

До геостатистичного моделювання в геоінформатиці, як правило, відносять діяльність, спрямовану на побудову (моделювання) безперервних поверхонь на основі масивів точкових даних, отриманих у результаті інструментальних вимірювань, відбору і обробки проб ґрунту, води, повітря та ін. або картометричних робіт з використанням вибіркового методу. Процедури просторового моделювання реалізовані в багатьох спеціалізованих пакетах, що досить широко використовуються на практиці.

Останніми роками *модулі геостатистичного аналізу і моделювання* включаються до складу інструментальних ГІС з розвиненими аналітичними можливостями. Вони дають можливість дослідження структури дискретних наборів просторово-координованих даних, побудови на їх основі безперервних поверхонь і, таким чином, оцінки (прогнозу) значень змінної в точках (комірках растра), у яких вона не визначалася (не спостерігалася, не вимірювалася), і оцінки точності (або похибки) цієї побудови з використанням статистичних методів. Як приклад таких модулів наведемо розширення (extention) Geostatistical Analyst (Геостатистичний аналіз), введене розробниками до складу ГІС-пакетів фірми ESRI, починаючи з пакетів сімейства *ArcGIS* версії 8.1.

Інтерполяція – обчислення проміжних значень якої-небудь величини за деякими відомими її значеннями. Інтерполяція використовується в багатьох прикладних напрямках наук про Землю. У метеорології інтерполюються дані спостережень метеостанцій для одержання карт погоди на великі території, інтерполюються дані океанологічних і гідрологічних вимірювань, будуються поля концентрацій речовин у різних середовищах та ін. У геології інтерполяція застосовується для побудови двовимірних і тривимірних моделей підземних масивів за даними точкових шарів.

В природоохоронній діяльності інтерполяцію даних застосовують для картографування територій за концентраціями забруднювальних речовин в атмосферному повітрі, отриманих в результаті польових досліджень або розрахункових методів на основі сформованого точкового шару даних. Існують різні методи інтерполяції даних як от найближче сусідство, зворотно-зважені відстані, сплайн-інтерполяція, кригінг тощо. Кожен з цих методів для однакової вибірки може дати результат, відмінний від інших, рис. 6.1.

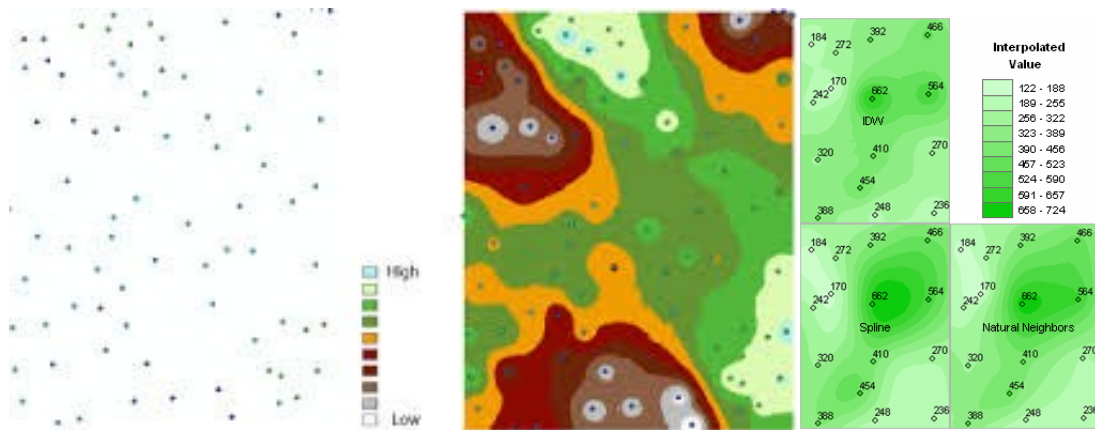


Рисунок 6.1 - Інтерполяція точкового шару різними методами

Іншим інструментом геопросторового аналізу, що реалізується засобами ГІС є класифікація даних. Використовується для формування класів для спрощення процедури аналізу, наприклад формування ізоліній приземних концентрацій за ГДК або формування мапи висот. Під час класифікації даних є можливість орати кількість класів та налаштувати діапазони їх значень різними способами: через рівні проміжки, за квантілями (рівномірно), або за явно вказаними значеннями. Таким чином, як і в попередньому випадку кінцевий результат для однієї вибірки даних теж може відрізнятися після класифікації, рис. 6.2.

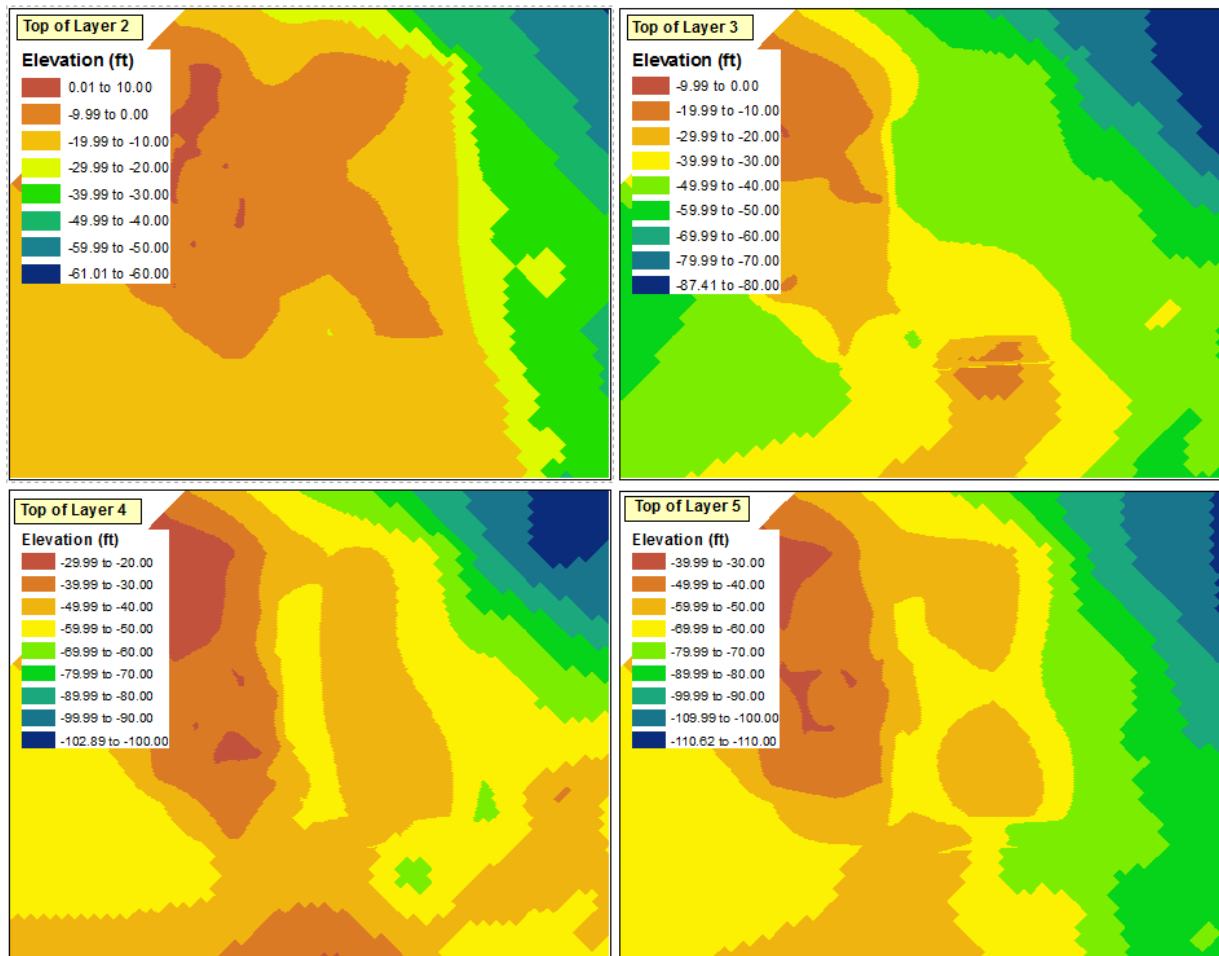


Рисунок 6.2 - Класифікація даних за різними методами та умовами

Ще одним ефективним інструментом що реалізується деякими програмними комплексами ГІС є зонально-статистичний аналіз даних. Цей інструмент дозволяє здійснити підрахунок даних кожного класу в межах контурів векторного шару та представити результати аналізу у табличній формі. Завдяки такому аналізу можна оперативно отримати дані наприклад про найбільші, середні і найменші значення приземних концентрації на території певного адміністративного району, санітарно-захисної зони промислового підприємства чи промзони залежно від обраного векторного шару, який містить контури відповідних об'єктів. Інший інструмент зональної статистики – *Tabulate Area* дозволяє розрахувати площі за класами в межах обраного об'єкту.

Приклад класифікації даних про забруднення атмосферного повітря викидами промислових підприємств м. Кам'янське наведено на рис. 6.3

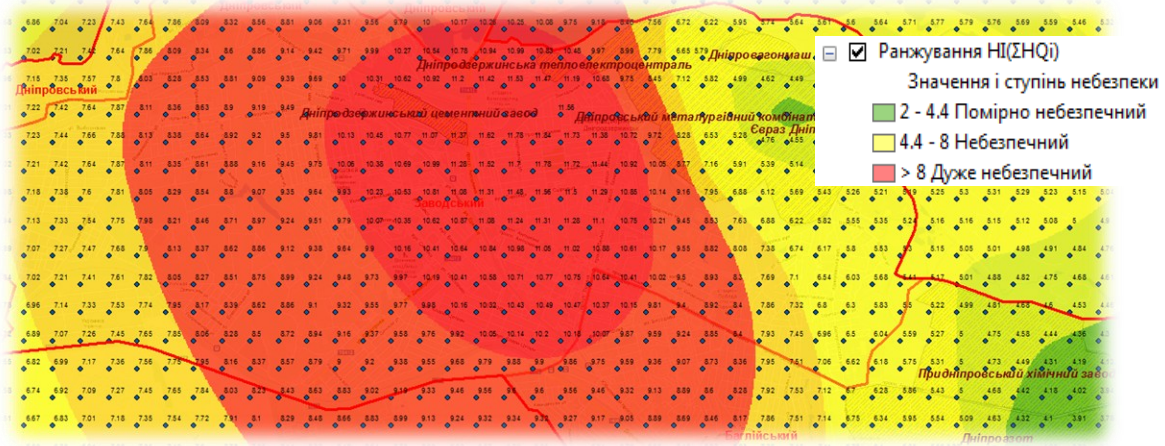


Рисунок 6.3 - Картографування території м. Кам'янське за індексами небезпеки для здоров'я населення

Результати зонально-статистичного аналізу районів м. Кам'янське за індексами небезпеки (НІ) представлені у таблиці 1.

Таблиця 6.1 – Зонально-статистичний аналіз районів м. Кам'янське за індексами небезпеки (НІ) для здоров'я населення від викидів підприємств

РАЙОН	Кількість точок розрахунку	Площа дослідження, м ²	Кількість жителів на дослідженій площі	Кількість жителів на точку розрахунку	Мінімальне	Максимальне	Діапазон	Більшість	Стандартне відхилення	Сума	Сумарний популяційний ризик
Заводський	230248	23024800	88631	0,38	4,26	11,84	7,58	8,52	1,94	1961800	755168,1
Дніпровський	28694	2869400	10098	0,35	6,71	11,02	4,31	8,26	0,99	236924	83374,3
Баглійський	206545	20654500	75109	0,36	2,94	10,73	7,79	5,93	1,78	1225670	445708,4
Кам'янське	465487	46548700	173837	0,37	2,94	11,84	8,90	7,57	1,57	3424394	1284250,8

Результати зонально-статистичного аналізу ранжування території м. Кам'янське за індексами небезпеки (HI) для здоров'я населення від викидів промислових підприємств, отриманих з використанням інструменту *Tabulate Area*, представлені у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Ранжування території м. Кам'янське за індексами небезпеки (HI) для здоров'я населення від викидів промислових підприємств

Територія (район)	Статистичний розподіл за індексами небезпеки (ступінь небезпеки)					
	2 – 4,4 (помірно небезпечний)		4,4 – 8 (небезпечний)		>8 (дуже небезпечний)	
	територія, %	Кількість мешканців, тис. осіб	територія, %	Кількість мешканців, тис. осіб	територія, %	Кількість мешканців, тис. осіб
Баглійський	25,95	19,5	58,87	44,2	15,17	11,4
Заводський	0,31	0,3	36,96	32,8	62,74	55,6
Дніпровський	0	0	48,66	4,9	51,34	5,2
м. Кам'янське	11,67	19,8	47,40	80,8	40,93	69,9

Отримані дані дозволяють визначати кількість населення за адміністративними районами яке зазнає небезпеки від забруднення атмосферного повітря викидами промислових підприємств.

Хід виконання роботи (в програмному середовищі *ArcGIS Desktop*)

1. Відкрити у каталозі *Dnipro* наступні шари даних: *DniproDistricts.shp*, *IndustrialEnterprises.shp*, *Smokestacks.shp* й *Schools.shp* та налаштувати їх зовнішній вигляд по аналогії з роботою 1.

2. Імпортувати розрахункові сітки приземних концентрацій від викидів ДМЗ та Придніпровської ТЕС (*File\Add Data\Add XY Data* – вказати на сторінки у файлах формату *MS Excel*: *PETROVSKOGO_EXPORT\$* та *PDDRES_EXPORT\$*);

3. З наборів розрахункових точок побудувати суцільну поверхню поля концентрацій за допомогою інструменту інтерполяція растру методом *IDW* (*Spatial Analyst Tool\Interpolation*). При використанні інструменту інтерполяції вказати параметри: *Z value field: HI*, *Output cell size: 10*, також в налаштуваннях *Environmental* для полів *Processing Extent(Extent)* та *Raster Analysis(Mask)*

вибрати шар *DniproDistricts*, щоб обмежити розрахунки та відображення нового шару межами міста. Надати новим растрам назви, наприклад *DMZ* та *PDDRES*.

4. Сформувати новий растровий шар на основі сумарних значень показників *HI* (від англ. *Hazard Index*) шарів *DMZ* та *PDDRES* за допомогою інструменту «калькуляція растру» (*Spatial Analyst Tool\Map Algebra\Raster Calculator*). Як варіант можна обрати функцію суми *Spatial Analyst Tool\Math\Plus*. Надати назву новому растру, наприклад *HI-Sum*.

5. Приєднати до шару *Schools* (який містить розташування ЗОШ у вигляді точкового шару) дані про сумарні розрахункові приземні концентрації за допомогою інструменту *Spatial Analyst/Extraction/Extract value to point*. При створенні надати назву новому шару, наприклад *Schools-HI*.

6. Застосувати для растру класифікацію за 4 квантілями та підібрати наглядні кольори й встановити напівпрозорість шарів.

7. Визначити статистичні показники концентрацій по районах Дніпра за допомогою інструменту зональної статистики (*Spatial Analyst Tool\Zonal\Zonal Statistic As Table*) та експортувати отримані результати у формат *.xls*.

8. Провести перекласифікацію растрового шару, що містить дані про розрахункові концентрації від викидів промисловості (*Spatial Analyst Tool\Reclass\Reclassify*)

9. Визначити площі забруднення районів міста за класами із використанням інструменту зональної статистики (*Spatial Analyst Tool\Zonal\Tabulate Area*) та експортувати сформовану таблицю у форматі *xls*, використовуючи інструмент *Conversion Tool\Table to Excel*

10. Налаштувати електронні таблиці та провести аналіз експортованих даних в програмі *Excel* для визначення кількості населення, що зазнає певний рівень забруднення.

Контрольні запитання

1. Для чого потрібно використовувати інтерполяцію геопросторових даних?

2. Які критерії висуваються до інтерполяції даних?

3. Який інструмент або метод геопросторового аналізу дозволяє розрахувати площі за різними рівнями чи діапазонами концентрацій забруднювальних речовин на території певного адміністративного району?

4. Які існують методи інтерполяції геопросторових даних засобами ГІС та у чому полягає специфіка їх використання?

5. Який інструмент дозволяє сформувати осереднений або сумарний (інтегральний) шар растрових даних на основі інших растрових шарів?

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ

Навчальні досягнення здобувачів вищої освіти за результатами вивчення курсу загалом оцінюватимуться за шкалою, що наведена нижче:

Рейтингова шкала	Інституційна шкала
90–100	відмінно
74–89	добре
60–73	задовільно
0–59	незадовільно

Здобувачі вищої освіти можуть отримати підсумкову оцінку з навчальної дисципліни на підставі поточного оцінювання знань за умови, якщо набрана кількість балів складатиме не менше як 60 балів.

Максимальне оцінювання:

Теоретична частина	Практична частина		Разом
	При своєчасному складанні	При несвоєчасному складанні	
60	40	30	100

Лабораторні роботи приймаються за контрольними запитаннями до кожної роботи.

Критерії оцінювання практичної роботи

За кожну лабораторну роботу здобувач вищої освіти може отримати наступну кількість балів:

5 балів: отримано правильну відповідь на контрольні запитання, з поясненням змісту окремих складових лабораторної роботи

4 бали: отримано правильну відповідь з незначними неточностями згідно з еталоном, відсутня формула та/або пояснення змісту окремих складових, або не зазначено одиниці виміру.

3 бали: отримано неправильну відповідь, проте використано формулу з поясненням змісту окремих її складових, зазначено одиниці виміру.

2 бали: отримано неправильну відповідь, проте використано формулу без пояснень змісту окремих її складових та не зазначено одиниці виміру.

1 бал: наведено неправильну відповідь, до якої не надано жодних пояснень.

Бонус до 10 балів до практичного модулю: за своєчасне складання робіт впродовж семестру.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Базова:

1. Стандарт вищої освіти підготовки магістрів зі спеціальності 101 «Екологія». СВО-2018. Київ : МОН України, 2018. 15 с.
2. Стандарт вищої освіти підготовки магістра зі спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища». СВО-2020. Київ : МОН України, 2020. 15 с.
3. Оцінка стану екосистем та їх компонентів (обрані теми) : навч.-метод. посіб. Дніпро : Типографія «Арбуз», 2020. 77 с.
4. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Кіріченко П. С. Моделювання і прогнозування стану довкілля : підручник для студентів вищ. навч. закл. Кривий Ріг : Р. А. Козлов, 2016. 207 с.

Додаткова:

1. Колесник В. Є., Бучавий Ю. В. Моделювання і прогнозування стану довкілля : метод. рек. до виконання курсової роботи для студентів освітньо-професійних програм «Екологія» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2022. 24 с.
2. Хом'як І. В. Моделювання та прогнозування стану довкілля : конспект лекцій. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2022. 72 с.
3. Пономаренко Є. Г., Ломакіна О. С. Методи аналізу екологічних систем та процесів : конспект лекцій для студентів 1 та 2 курсів усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища». Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 41 с.
4. Ляшенко І. М., Мукоєд А. П. Моделювання біологічних та екологічних процесів : навч. посіб. Київ : Київський університет, 2002. 340 с.
5. Зайцев А. С., Колесник В. Є. Дослідження процесу утворення та виносу пилу з конвеєрної галереї вуглезбагачувальної фабрики. *Тиждень студентської науки - 2021* : матеріали 76-ї студентської науково-технічної конференції (м. Дніпро, 12–16 квітня 2021 р.). Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2021. С. 179–183.
6. Колесник В. Є., Павличенко А. В., Монюк І. В. Обґрунтування розрахункового методу оперативного визначення поточних викидів міських котелень, показників їх енергоефективності та ступеня екологічної небезпеки. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2020. № 60. С. 162–176. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/60.162>.
7. Хом'як І. В. Екосистемологія : навч. посіб. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2022. 235 с.

8. Колесник В. Є., Борисовська О. О., Монюк І. В. Аналіз визначальних чинників екологічної небезпеки та заходів по її зниженню в системі «котельня – споживачі тепла – довкілля». *Збірник наукових праць Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»*. 2023. № 73. С. 218–228. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/73.218>.

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ	3
1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1	5
2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2	13
3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3	18
4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4	26
5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5	Помилка! Закладку не визначено.
6. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6	28
КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	41

Навчальне видання

Колесник Валерій Євгенійович
Бучавий Юрій Володимирович

МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОСИСТЕМ І ПРОЦЕСІВ

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт
для здобувачів ступеня магістра освітньо-професійної програми «Екологія»
зі спеціальності Е2 Екологія, освітньо-професійної програми «Технології
захисту навколишнього середовища» зі спеціальності G2 Технології захисту
навколишнього середовища

Видано в авторській редакції.

Електронний ресурс.
Підписано до видання 01.09.2026. Авт. арк. 1,5.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».
49005, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 19.