

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**З Б І Р Н И К
МЕТОДИЧНИХ ВКАЗІВОК**

до практичних робіт з дисципліни
"Моделювання та прогнозування стану довкілля"

Одеса-2006

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**З Б І Р Н И К
МЕТОДИЧНИХ ВКАЗІВОК
до практичних робіт
з д и с ц и п л і н и
"Моделювання та прогнозування стану довкілля"**

Затверджено
методичною комісією факультету
протокол №___ від __.__.2006

Одеса-2006

Збірник методичних вказівок до практичних робіт з дисципліни "Моделювання та прогнозування стану довкілля" для студентів III курсу денної форми навчання за спеціальністю "Екологія та охорона навколишнього середовища". / Полетаєва Л.М., Юрасов С.М., Ільїна В.Г. , Чернякова О.І., Грабко Н.В., Фролова Н.М., – Одеса: ОДЕКУ, 2006. – 140 с.

ЗМІСТ

	ПЕРЕДМОВА	
1	СИНОПТИКО-СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ У МІСТІ	
	1.1 Метеорологічні аспекти розсіяння домішок в атмосфері.....	
	1.2 Загальна характеристика методів прогнозу забруднення атмосфери.....	
	1.3 Процедура вибору предиктанта та формування складу пре дикторів.....	
	1.4 Підготовка вихідних даних для розрахунків	
	1.5 Прогнозування забруднення повітря методом лінійного регресійного аналізу	
	1.6 Процедура перевірка адекватності моделі.	
	1.7 Прогнозування забруднення повітря методом розпізнавання образів	
2	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА.....	
	2.1 Побудова режимної функції і прогноз висоти хвиль.....	
	2.1.1 Основні положення.....	
	2.1.2 Побудова режимної функції.....	
	2.1.3 Прогнозування режиму хвилювання.....	
	2.1.4 Контрольні запитання.....	
	2.1.5 Завдання для самостійної роботи.....	
	2.1.6 Приклад розрахунку.....	
	Перелік посилань.....	
	2.2 Розрахунок розводження стічних вод в потоке (плоска постановка задачі).....	
	2.2.1 Вивід розрахункової формули.....	
	2.2.2 Вихідні дані.....	
	2.2.3 Послідовність розрахунку.....	
	2.2.4 Контрольні запитання.....	
	2.2.5 Завдання для самостійної роботи.....	
	2.2.6 Приклад розрахунку.....	
	Перелік посилань.....	
	2.3 Розрахунок розводження стічних вод в потоке (просторова задача).....	
	2.3.1 Вивід розрахункової формули.....	
	2.3.2 Вихідні дані для розрахунку.....	
	2.3.3 Послідовність розрахунку.....	

2.3.4	Контрольні запитання.....
2.3.5	Завдання для самостійної роботи.....
2.3.6	Приклад розрахунку.....
	Перелік посилань.....
2.4	Розрахунок розповсюдження речовини у водному середовищі при аварійних розливах (в циліндричних координатах)
2.4.1	Розв'язання диференціального рівняння.....
2.4.2	Вихідні дані для розрахунку.....
2.4.3	Послідовність розрахунку.....
2.4.4	Контрольні запитання.....
2.4.5	Завдання для самостійної роботи.....
2.4.6	Приклад розрахунку.....
	Перелік посилань
2.5	Розрахунок розповсюдження речовини у водному середовищі при аварійних розливах (в прямокутних координатах).....
2.5.1	Розв'язання диференціального рівняння.....
2.5.2	Вихідні дані.....
2.5.3	Послідовність розрахунку.....
2.5.4	Контрольні запитання.....
2.5.5	Завдання для самостійної роботи.....
2.5.6	Приклад розрахунку.....
	Перелік посилань
2.6	Спрощени методи розрахунку розповсюдження речовини в потоках.....
2.6.1	Метод УралНДІВГ.....
2.6.2	Метод Галінського політехнічного інституту (ТПІ).....
2.6.3	Експрес – метод ДГІ.....
2.6.4	Метод ВОДГЕО.....
2.6.5	Контрольні запитання.....
2.6.6	Завдання для самостійної роботи.....
2.6.7	Приклади розрахунку.....
	Перелік посилань

ПЕРЕДМОВА

Вивчення курсу “Моделювання та прогнозування стану довкілля” необхідна ланка у процесі підготовки студентів по екологічним спеціальностям. Ця навчальна дисципліна належить до професійно-орієнтованого циклу. Дисципліна “Моделювання та прогнозування стану довкілля” викладається при підготовці студентів за спеціальностями 7.070800 “Екологія і охорона навколишнього середовища” напряму “Екологія”.

Метою вивчення курсу “Моделювання та прогнозування стану довкілля” є формування у студентів теоретичних знань та практичних навичок у галузі математичного моделювання реальних процесів розповсюдження шкідливих домішок у довкіллі, складання прогнозів забруднення довкілля та застосування їх для регулювання промислових викидів підприємств в навколишнє середовище. Отримані знання та навички необхідні для роботи у державних та відомчих виробничих підрозділах, що здійснюють контроль стану навколишнього природного середовища, а також у науково-дослідних установах, яки займаються проблемами охорони довкілля.

Завдання курсу - вивчення механізму забруднення навколишнього середовища, транспорту, міграції, перетворення забруднюючих речовин; засвоєння узагальнених моделей якості атмосферного повітря та води; засвоєння методик прогнозів забруднення довкілля.

Вивчення курсу "Моделювання та прогнозування довкілля" повинно зумовити набуття студентами таких **знань та вмінь**:

- засвоїти основні терміни і поняття, що застосовуються в межах означеного курсу;
- знати основні математичні моделі розрахунку розповсюдження шкідливих домішок;
- вміти складати прогнози забруднення повітря та поверхневих вод із застосуванням їх для регулювання промислових викидів підприємств в довкілля;
- вміти аналізувати вплив метеорологічних умов на рівень забруднення атмосфери з врахуванням особливостей окремих міст та окремих підприємств;
- мати уяву щодо застосування та ефективності прогностичних схем в окремих регіонах;
- орієнтуватися з питань недоліків існуючих моделей і схем прогнозу та шляхів їх удосконалення і розвитку.

1 СИНОПТИКО-СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ У МІСТІ

1.1 Метеорологічні аспекти розсіяння домішок в атмосфері

Захист атмосфери від забруднення в умовах потужної урбанізації та індустріалізації став однією із найбільш актуальних сучасних проблем.

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

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

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

При штилі основний вклад у забруднення повітря вносять низькі викиди. Саме тому штильовий максимум найбільш виражено взимку, коли внаслідок зниженого турбулентного обміну ослаблене розсіювання низьких і надходження в приземний шар високих викидів.

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

$$v_m = 0.65^3 \sqrt{\frac{V \Delta T}{H}} ; \quad (1.1)$$

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

$$V = \frac{\pi D^2 \omega_0}{4} \quad (1.2)$$

де D - діаметр устя джерела викиду, м;

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

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

H - висота труби, м.

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

$$u_m = 0.5 \quad \text{при} \quad v_m \leq 0.5; \quad (1.3)$$

$$u_m = v_m \quad \text{при} \quad 0.5 < v_m \leq 2 ; \quad (1.4)$$

$$u_m = v_m \left(1 + 0.12 \sqrt{10000 \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta T}} \right) \quad \text{при} \quad v_m > 2; \quad (1.5)$$

Для холодних викидів u_m розраховується через параметр

$$v'_m = 1.3 \frac{\omega_0 D}{H}; \quad (1.6)$$

по формулах

$$u_m = 0.5 \quad \text{при} \quad v'_m \leq 0.5; \quad (1.7)$$

$$u_m = v'_m \quad \text{при} \quad 0.5 < v'_m \leq 2; \quad (1.8)$$

$$u_m = 2.2 v'_m \quad \text{при} \quad v'_m > 2. \quad (1.9)$$

Коли основний вклад вносять низькі джерела викидів, то підвищений рівень забруднення повітря в районі викиду відзначається при слабких вітрах (0-1м/с) за рахунок накопичення домішок у приземному шарі. За даними, отриманими Берляндом М.Є. і Безуглою Е.Ю. [1,2], як правило концентрації домішок при вітрі швидкістю 0-1 м/с на 30-70% вище, ніж при інших швидкостях. Однак Сонькін Л.Р., Разбегаєва Е.А. і ін. знайшли два максимуми швидкості вітру, при яких відбувається зростання вмісту інгредієнтів в атмосфері [5]. Другий максимум (при швидкостях 3-6 м/с) Берлянд М.Є. пояснює викидами найбільш потужних високих джерел (рис. 1.1) [1].

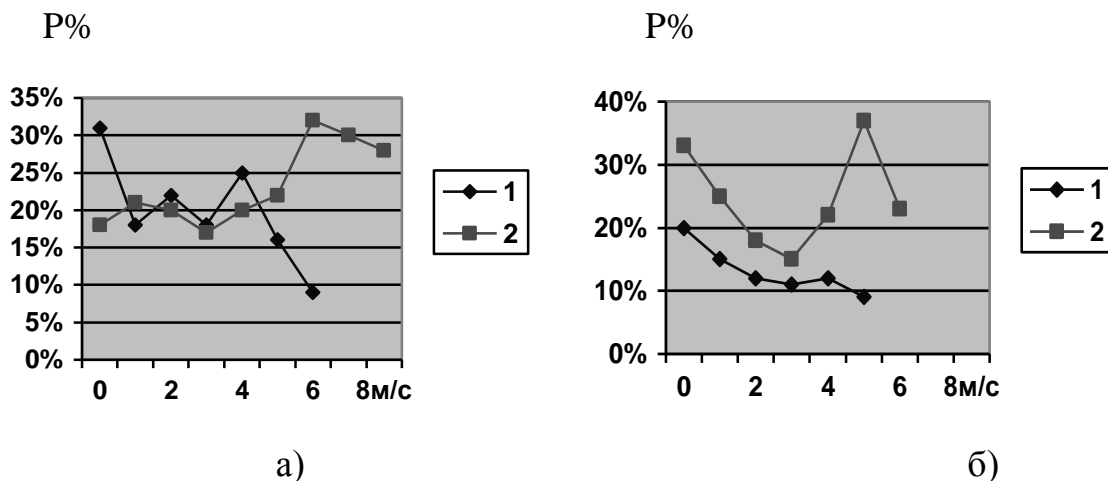


Рисунок 1.1 - Повторюваність P(%) підвищених концентрацій SO₂ (а) і пилу (б) при різних швидкостях вітру в холодний (1) і теплий (2) періоди [5].

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

До основних факторів, що визначають розсіювання домішок, відноситься стратифікація атмосфери, у тому числі інверсія температури (підвищення температури повітря з висотою). Інверсії ослаблюють вертикальний обмін повітря. Якщо шар підвищеної інверсії розташовується безпосередньо над джерелом викидів, то в приземному шарі атмосфери створюються небезпечні умови забруднення, тому що інверсійний шар обмежує підйом викидів і сприяє їхньому накопиченню в приземному шарі. Якщо шар підвищеної інверсії розташовано на досить великій висоті від труб підприємств, то концентрація домішки буде істотно менше. Шар інверсії, розташований нижче рівня викидів, перешкоджає переносу їх до земної поверхні (рис.1.2). Вивчення питання про вплив інверсій на концентрацію шкідливих домішок в атмосфері промислових міст показало, що при наявності інверсійного шару домішок у повітрі на 10-60% більше, ніж при його відсутності [2].

\bar{P}

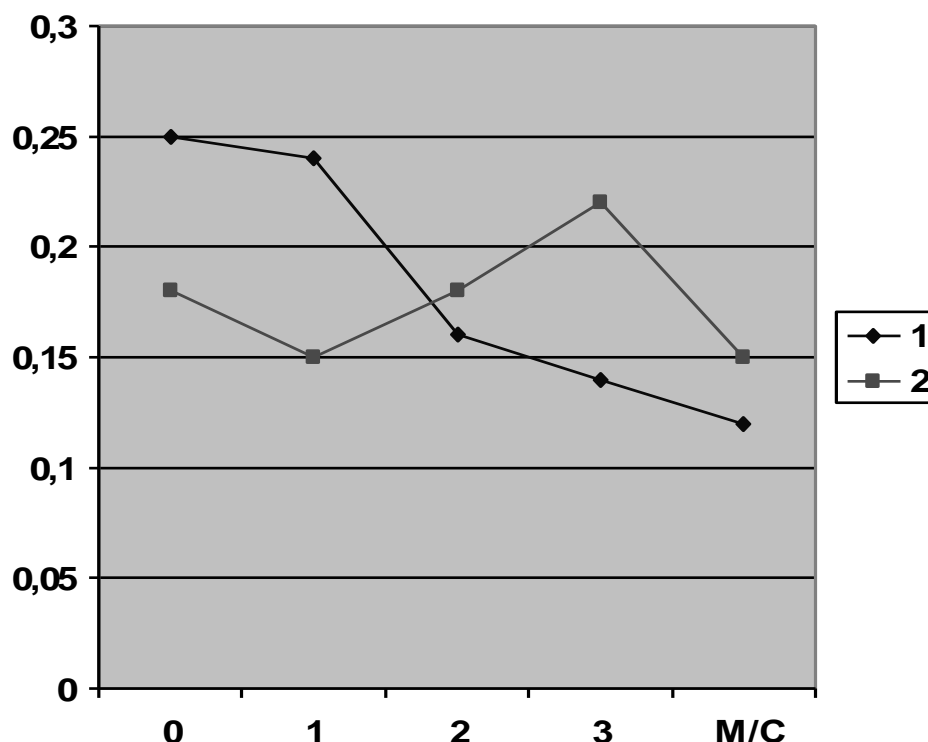


Рисунок 1.2 - Залежність параметра \bar{P} від швидкості вітру при наявності (1) і відсутності (2) приземної інверсії [5].

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

Зі слабкими швидкостями вітру і стійким станом атмосфери зв'язують епізоди значного забруднення повітря від низьких джерел. Таку ситуацію (приземна інверсія температури в поєднанні зі слабким вітром 0-1 м/с) прийнято називати "застій повітря". Умови застою звичайно зв'язані з великомасштабними атмосферними процесами, найчастіше з антициклонами, при яких у прикордонному шарі атмосфери спостерігаються слабкі вітри і формуються приземні радіаційні інверсії. Довідка про комплекс аномально небезпечних метеорологічних умов надана у табл.1.1

Поряд з антициклонічним типом синоптичних ситуацій, при якому звичайно відзначаються максимальні концентрації інгредієнтів, виділяють також циклонічне (теплий сектор) і проміжне поле (периферія циклонів і антициклонів) [5]. Розвиті циклони протягом усього року сприяють очищенню міського повітря від шкідливих домішок. Ефект підвищеного забруднення в стаціонарних антициклонах виявляється узимку значно більше, ніж улітку. Очевидно, це зв'язано з відсутністю в літню пору року потужних інверсій. Чим вище середній рівень забруднення повітря, тим більше небезпека високих значень концентрацій у стаціонарних антициклонах. Таким чином, умови застою більш небезпечні для міста з високим рівнем забруднення атмосфери.

Таблиця 1.1 - Аномально небезпечні метеорологічні умови для основних груп джерел викидів

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

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

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

Відмінність дифузії домішки при опадах, у порівнянні з туманами і хмарами, в основному, обумовлена більш великим розміром крапель і тому їхнім більш швидким випадінням. Найбільш інтенсивне вимивання елементів відбувається при випаданні перших 3-4 мм опадів, далі значного зменшення концентрації не відзначається. Зливові опади очищають повітря сильніше, ніж обложні. Опади, що випадають у виді снігу, у 3-4 рази ефективніше вимивають аерозолі, чим дощ, що обумовлено великою поверхнею сніжинок і меншою швидкістю їхнього падіння. Так, при одній і тій же інтенсивності опадів у сніговій воді сульфатів і нітратів міститься в кілька разів більше, ніж у дощовий. Таким чином, опади зменшують фонове забруднення повітря в місті, що є результатом сумарної дії всіх джерел домішок.

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

На підставі аналізу матеріалів спостережень у ряді міст [5] виявили сильний вплив на рівень забруднення атмосфери інерційного фактору.

Тобто, значення показника фонового забруднення (P) істотно залежить від значення показника фонового забруднення (P') у попередні дні (коефіцієнт кореляції між P сусідніх днів 0,5-0,8). Інерційний фактор зв'язаний з «метеорологічною інерцією», тобто з тенденцією до збереження тих метеорологічних умов, що визначають рівень змісту домішок у повітрі.

1.2 Загальна характеристика методів прогнозу забруднення атмосфери

Вивчення метеорологічних умов забруднення повітря – це основа для його прогнозування, тому що завдання складається з того, щоб одержувати надійні характеристики з використанням яких можна запобігти формуванню високих рівнів концентрацій при несприятливих метеорологічних умовах (НМУ).

Доцільно проводити розробку прогнозу забруднення повітря двох видів : у районі окремих джерел і по місту в цілому.

Методи прогнозування забруднення повітря по місту в цілому ґрунтуються на результатах аналізу впливу метеорологічних та синоптичних умов на формування полів концентрацій домішок.

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

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

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

Велике значення має вибір методу, який дозволив би максимально врахувати реальний вид характеру зв'язків між концентраціями та метеорологічними факторами. Для прогнозування забруднення повітря по

місту в цілому необхідно попередньо обробити фактичні матеріали спостережень по конкретному місту за попередні роки

Аналіз різних комбінацій метеорологічних умов за попередню добу та рівня забруднення у наступну добу та по даним спостережень за ряд років дозволили отримати правила прогнозу забруднення повітряного басейну міста [7]. Справджуваність такого прогнозу у деяких містах досягає 90%.

Забруднення повітря також можливо прогнозувати методом схожості конкретної ситуації з ситуацією, характерної для будь-якої групи забруднення – підвищеного, середнього або зниженого. Справджуваність прогнозів по даному методу у більшій кількості міст склала 75%. Достоїнством даного методу є краще врахування реального виду зв'язків між показниками забруднення повітря та метеорологічними факторами. Недоліком є те, що при складних зв'язках (наприклад, при наявності двох максимумів забруднення у залежності від швидкості вітру) в одну групу попадають суттєво різні значення предикторів. Тому при використанні методу розпізнавання образів (МРО) найкраще вибирати такі предиктори, з якими зв'язок є монотонний.

Метод послідовної графічної регресії дозволяє найбільш повно врахувати відомі закономірності та виявлені по матеріалам спостережень в конкретних містах зв'язки між концентраціями домішок у повітрі і метеорологічними параметрами. При використанні даного методу на першому етапі будуються попередні графіки, на кожному з двох предиктантів. Далі графіки парами об'єднуються до отримання останнього графіка. На ньому предиктант представлено функцією усіх предикторів. Кількість предикторів не обмежується, а вигляд зв'язку між ними та характеристиками забруднення повітря не має значення. Справджуваність прогнозів при використанні методу послідовної графічної регресії 72-84%.

У випадку, якщо існує лінійний зв'язок між окремими предикторами та предиктантом, при створенні прогностичної моделі використовують метод лінійного регресійного аналізу. Справджуваність прогнозів при використанні даного методу складало для деяких міст 93% на залежному матеріалі та 80% - на незалежному. Суть методу складається у знаходженні предикторів, які мають з предиктантом найбільш значний кореляційний зв'язок. Потім частіше усього методом найменших квадратів (МНК) розраховують коефіцієнти регресії і одержують лінійне регресійне рівняння. Регресійну прогностичну модель частіше усього будують методом покрокової регресії (МПР).

1.3 Процедура вибору предиктанта та формування складу предикторів

Для статистичних прогнозів предиктантом (прогнозованим показником) найчастіше є усереднені у часі та просторі характеристики забруднення повітря, а не одиничні концентрації. Фонове забруднення характеризується узагальненими інтегральними показниками вмісту шкідливих домішок по місту в цілому. Такі характеристики менш підлягають випадковим відхиленням, ніж концентрації в окремих точках міста. Вони менше залежать від режиму викидів та в основному визначаються метеорологічними факторами і термодинамічними умовами розсіювання домішок у атмосфері. Тому доцільно для складання короткострокових прогнозів у якості предиктанта взяти один з показників фоновго забруднення (середнє значення концентрації інгредієнта, обчислене за даними вимірювань за добу, нормованих на середньосезонну концентрацію - нормована безрозмірна \tilde{q} чи параметр Сонькина Р).

Найпоширенішим з інтегральних показників є середнє значення концентрації інгредієнта, обчислене за даними вимірювань у конкретний строк (або за добу) в усіх точках міста, нормованих на середньосезонну концентрацію:

$$\tilde{q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{\bar{q}_{ci}}, \quad (1.10)$$

де N - число контрольно-вимірювальних постів (КВП) у місті,;

q_i - середньодобова концентрація домішки на i -му КВП;

\bar{q}_{ci} - середньосезонна концентрація домішки на i -му КВП.

Якщо розрахунок виконується за даними, для яких вже розраховані середньомісячні концентрації інгредієнтів, середньосезонна концентрація \bar{q}_{ci} визначається як середнє з трьох середньомісячних концентрацій інгредієнтів на i -му КВП певного сезону.

Наприклад для літа:

$$\bar{q}_{ci} = \frac{\bar{q}_{6i} + \bar{q}_{7i} + \bar{q}_{8i}}{3}. \quad (1.11)$$

Залежно від значення параметра \tilde{q} розрізняють чотири класи фонового забруднення повітря. Характеристика класів забруднення приведена у табл.1.2

Таблиця 1.2 – Характеристика класів фонового забруднення (\tilde{q})

Клас забруднення	Кількісне значення параметру	Якісна оцінка забруднення
1	$\tilde{q} \geq 1,5$	Високе
2	$1,0 \leq \tilde{q} < 1,5$	Підвищене
3	$0,6 \leq \tilde{q} < 1,0$	Знижене
4	$\tilde{q} < 0,6$	Слабке

Л.Р. Сонькин [3] запропонував ще один інтегральний показник забруднення повітря:

$$P = \frac{m}{n}, \quad (1.12)$$

де n - загальна кількість спостережень за концентрацією домішки протягом доби на всіх КВП міста;

m - кількість спостережень протягом цієї самої доби з концентраціями q (разовими), що перевищують середньосезонну величину \bar{q}_{ci} більш, ніж у 1,5 рази.

Щоб отримати щоденні значення параметра P , заздалегідь обчислюють середньосезонні значення концентрацій для кожного стаціонарного пункту вимірювань окремо для кожної домішки.

Параметр P може змінюватися від одиниці (якщо всі вимірювані концентрації перевищують більш ніж у 1,5 рази середньосезонну концентрацію) до нуля (жодна з концентрацій її не перевищує).

Для розрахунку параметра P та його використання як характеристики фонового забруднення повітря необхідно дотримуватися двох умов:

- кількість КВП у місті має бути не меншою від трьох;
- кількість спостережень за концентраціями домішок у повітрі на всіх пунктах протягом доби має бути не меншою за 20.

Залежно від значення P розрізняють три класи рівня забруднення. Їх характеристика приведена у табл.1.3

Таблиця 1.3 - Характеристика класів фонового забруднення (P)

Клас забруднення	Кількісне значення параметру	Якісна оцінка забруднення
1	$P \leq 1$	Високе
2	$0,2 \leq P < 0,35$	Відносно підвищене
3	$0 < P < 0,2$	Знижене

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

Зв'язки між характеристиками забрудненням повітря і метеорологічними параметрами являються складними та нелінійними. Це заважає використовувати метод лінійної регресії для складання практичних прогностичних схем. Але в деяких випадках використання цього методу можливе та доцільне. Умовою його використання з'являється наявність достатнього лінійного зв'язку між характеристиками забруднення повітря (предиктантом) та окремими предикторами. Між визначеними для прогнозу предикторами не повинно бути лінійного зв'язку.

Дуже часто значення коефіцієнта лінійної кореляції (між P і P') дає можливість гарантувати наявність лінійного зв'язку між одним з предикторів P' та предиктантом P . У такому випадку можливо використовувати метод лінійної регресії для складання практичних прогностичних схем. Коефіцієнти регресії розраховуються методом найменших квадратів.

Для підвищення ефективності прогнозу методом множинної лінійної регресії можливо попереднє виключення нелінійного зв'язку між характеристиками забруднення повітря (предиктантом) та метеорологічними величинами (предикторами). Для цього по матеріалах спостережень в кожному місті виконують перетворення предикторів з урахуванням справжнього вигляду зв'язків між ними та предиктантом.

Прийнявши до уваги вищесказане можна для складання прогнозу методом лінійного регресійного аналізу пропонувати (як приклад) у якості предиктанта параметр P , а у якості предикторів такі величини:

- T - температура повітря у землі, $^{\circ}C$;
- D - напрямок вітру у землі, градуси;
- V - швидкість вітру у землі, м/с;
- F - відносна вологість у землі, %;
- H_1 - верхня границя приземної інверсії, м;
- H_2 - нижня границя підвищеної інверсії, м;
- H_3 - верхня границя підвищеної інверсії, м;
- Y_{0-500} - вертикальний температурний градієнт у шарі 0...500м, градусів на 100м;
- P' - інтегральні характеристики рівня забруднення в місті за попередню прогнозу добу.

Вищенаведений перелік предикторів для складання прогнозу може у кожному конкретному випадку мати іншу кількість та склад, який залежить від особливостей забруднення атмосфери кожного промислового міста.

Головне для вибору предикторів - врахування характеру та тісноти зв'язку між ними та показниками забруднення атмосфери. Щоб виявити фактори, які більш усього впливають на забруднення повітря, необхідно побудувати графіки зв'язку кожного предиктора з предиктантом. Аналіз кореляційних графіків дасть можливість виявити ті предиктори, які мають лінійний зв'язок з предиктантом. Ті ж предиктори, які не мають статистично значимого кореляційного зв'язку, можна виключити з розрахунків, постільки вони можуть погіршити прогностичну модель.

1.4 Підготовка вихідних даних для розрахунків

На першому етапі прогнозування необхідно визначитись з предиктантом. Коли предиктант визначено, то формують відповідний до нього склад предикторів. Після цього приступають к підготовці вихідних даних. Для цього використовують результати даних спостережень о забрудненні атмосфери того промислового міста, для якого розробляється прогностична схема та результати метеорологічних спостережень на метеостанції.

Наприклад, якщо якості предиктанта візьмемо параметр P , а у якості предикторів такі величини, як температура повітря, напрямок вітру, швидкість вітру, відносна вологість, характеристики розташування інверсії, вертикальний температурний градієнт у шарі та параметр P' за попередню прогнозу добу, то вихідні данні мають вигляд вектора-рядка, який не повинен мати пропуски яких - не будь вищезгаданих даних. Таких векторів-рядків необхідно вибрати не менш за 35 (це мінімальний об'єм вибірки).

Дуже зручно формувати вибірку вихідних даних у вигляді таблиці, яка для нашого прикладу має вигляд, представлений у таблиці 1.4.

Після підготовки матриці вихідних даних треба визначити прогностичний метод, який найбільш підходить для конкретного випадку.

Велике значення має вибір методу, що дозволив би максимально врахувати реальний вид характеру зв'язків між характеристиками забруднення повітря і метеорологічними факторами. Для прогнозування забруднення повітря по місту в цілому необхідно попередньо виконати обробку фактичних матеріалів спостережень по конкретному місту за попередні роки. Для цього проводять додаткові дослідження вихідних даних з урахуванням достоїнств та недоліків існуючих методів прогнозу забруднення повітря. Вибір найбільш підходящого методу з досить великої кількості прогнозів - це дуже складна задача, від якої в кінцевому підсумку залежить успішність складених прогнозів.

Таблиця 1.4 - Загальний вигляд таблиці для формуванні вихідних даних при прогнозуванні забруднення атмосфери міста

Дата	T	D	V	F	H ₁	H ₂	H ₃	Y ₀₋₅₀₀	P'	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Коли метод прогнозу забруднення атмосфери остаточно встановлений, то можна переходити к розрахункам.

1.5 Прогнозування забруднення повітря методом лінійного регресійного аналізу

У випадку, якщо існує лінійний зв'язок між окремими предикторами та предиктантом, при створенні прогностичної моделі використовують метод лінійного регресійного аналізу. Справджуваність прогнозів при використанні даного методу складало для деяких міст 93% на залежному матеріалі та 80% - на незалежному.

Суть методу складається у знаходженні предикторів, які мають з предиктантом найбільш значний кореляційний зв'язок. Потім найчастіше частіше з використанням методу найменших квадратів (МНК) розраховують коефіцієнти регресії і одержують лінійне регресійне рівняння. Регресійну прогностичну модель частіше усього будують методом покрокової регресії (МПР).

Вивчення процесів, які в атмосфері обумовлюють переніс і дифузію домішок у граничному шарі, дає можливість визначити фактори, які можуть бути предикторами у статистичних прогностичних моделях. Початкове число цих факторів або потенціальних предикторів, може бути достатньо великими. Проте остання обставина не поліпшує розрахункову схему, оскільки збільшує дисперсію помилок. Це пов'язано з тим, що матриця кореляції, на якій основана система нормальних рівнянь знаходиться емпірично з використанням експериментальних даних, які вміщують помилку вимірювань. Незалежні предиктори не вносять суттєвої помилки у параметри моделі, так як у цьому випадку матриця кореляції добре обумовлена.

Проте у зв'язку з тим, що серед великої кількості потенціальних предикторів є велике число статистично зв'язаних один з одним, матриця кореляції предикторів виявляється погано обумовленою. У цьому випадку помилки вимірювань, які вміщуються у вихідних даних, суттєво впливають на правдивість оцінок параметрів моделі, а отже, і на адекватність моделі реальним процесам. Таким чином, при складанні прогностичних схем з використанням методу лінійної регресії необхідна наявність лінійного зв'язку між показником забруднення повітря (предиктантом) і хоч би одним метеорологічним параметром (предиктором).

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

Процедура, яка дозволяє вибрати оптимальний склад статистично зв'язаних предикторів, прийнято називати просіюванням предикторів. Існує декілька методів. Самий поширений з них – метод покрокової регресії (МПР).

Розглянемо скорочений алгоритм МПР.

По-перше, складається матриця $\tilde{X}(n \times m)$ вихідних даних розміром $n \times m$, де :

- m – кількість предикторів плюс предиктант;
- n – кількість рядків або векторів предикторів.

По-друге, розраховується середнє значення кожного стовпчика матриці \tilde{X} :

$$\bar{\tilde{X}}_i = \frac{1}{n} \sum_{L=1}^n \tilde{X}_{iL}; \quad i = \overline{1, m} \quad L = \overline{1, n} \quad (1.13)$$

По-третє, знаходиться середнє квадратичне відхилення кожного стовпчика матриці:

$$\tilde{\sigma}_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{L=1}^n (\tilde{X}_{iL} - \bar{\tilde{X}})^2} \quad (1.14)$$

На четвертому кроці кожне значення вихідної матриці центруються та нормуються на середнє квадратичне відхилення:

$$X_{iL} = \frac{\tilde{X}_{iL} - \bar{\tilde{X}}}{\tilde{\sigma}_i} \quad (1.15)$$

Це процедура необхідна для приведення усіх значень матриці до одного порядку.

На п'ятому кроці розраховується середнє та середнє квадратичне відхилення для нової центрованої та нормованої матриці X по формулам (1.13) та (1.14).

На шостому кроці знаходиться приєднана матриця кореляції $R_{xy}(m \times m)$, у полі якої – коефіцієнти кореляції між всіма предикторами, а останній стовпчик поміщені коефіцієнти кореляції предиктанта Y з кожним із предикторів X :

$$R_{xy} = \begin{pmatrix} 1 & r_{x1x2} & r_{x1x3} & \dots & r_{x1y} \\ r_{x2x1} & 1 & r_{x2x3} & \dots & r_{x2y} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{yx1} & r_{yx2} & r_{yx3} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (1.16)$$

На сьомому кроці проводиться аналіз останнього стовпчика матриці R_{xy} та вибирається найбільше значення коефіцієнту детермінації:

$$\max[r_{yxi}^2]; \quad i = \overline{1, m} \quad (1.17)$$

Предиктору, який має максимальний r_{yxi}^2 , привласнюється номер один.

На восьмому кроці за допомогою МНК отримуємо рівняння регресії :

$$\hat{y}^{(1)} = A_1 X_1 + A_0 \quad (1.18)$$

де A_1 - астинний коефіцієнт лінійної регресії;

A_0 - вільний член .

На дев'ятому кроці находимо перші різниці:

$$\xi_{1i} = y_i - \hat{y}_y^{(1)} \quad (1.19)$$

На десятому кроці розраховується частковий коефіцієнт кореляції

між ξ_{1i} та всіма предикторами, що залишились :

$$r_{\xi_{1i} \cdot X_i}; \quad i = \overline{2, m} \quad (1.20)$$

Далі вибирається другий по значущості предиктор з умови (1.17) і йому привласнюється номер два (другий).

Отримуємо рівняння регресії з двома предикторами за допомогою МНК.

Знаходимо другі різниці:

$$\xi_{2i} = y_i - \hat{y}_y^{(2)} \quad (1.21)$$

Після цього розраховується частковий коефіцієнт кореляції між ξ_{2i} та всіма предикторами, що залишилися :

$$r_{\xi_{2i} \cdot X_i}; \quad i = \overline{3, m} \quad (1.20)$$

Далі вибирається третій по значущості предиктор з умови (1.17) і йому привласнюється номер три (третій).

Процедура продовжується до тих пір, поки різниця коефіцієнтів множинної кореляції (ΔR) на двох сусідніх кроках стає не значимою. Значущість ΔR оцінюється за допомогою критерію Фішера через перевірку відповідної гіпотези.

В результаті отримуємо рівняння лінійної регресії з використанням розрахованих параметрів на визначеному кроці, яке має загальний вигляд:

$$\hat{y} = A_1 X_1 + A_2 X_2 + \dots + A_k X_k + A_0 \quad (1.21)$$

Це рівняння лінійної регресії включає k статистично значущих предикторів, які вичерпують основну частину дисперсій предиктанта.

1.6 Процедура перевірка адекватності моделі.

Після аналізу розрахунків та складання прогностичної схеми обов'язковим етапом є перевірка адекватності моделі на залежному, а потім на незалежному матеріалі. Перевірка адекватності моделі проводиться у три етапи.

Перший етап перевірки адекватності прогностичної моделі - побудова графіку зв'язку фактичного P (предиктант) та $P_{\text{прогн}}$ (отриманого в результаті прогнозу). Аналіз графіку проводиться для встановлення виду зв'язку. Якщо просліджується лінійна залежність фактичної і прогностичної величин, то модель адекватна реальному процесу.

Найбільш очевидний спосіб оцінки ефективності прогнозу забруднення повітря - розрахунок коефіцієнта кореляції (r) між прогностичними та фактичними значенням параметрів забруднення атмосфери міста. Така оцінка може бути виконана тільки для тих методів, які дозволяють прогнозувати значення методом послідовної графічної регресії та методом лінійного регресійного аналізу. Метод розпізнавання образів дозволяє прогнозувати лише групу забруднення у місті, а значить його ефективність не може бути оцінена за допомогою r .

Ефективність методу прогнозу забруднення повітря можливо вважати задовільною, якщо коефіцієнта кореляції (r) між прогностичними та фактичними значенням параметрів забруднення атмосфери міста. не менш 0,7 . У цьому випадку метод враховує більше половини загальної мінливості предиктанта.

Другий етап перевірки адекватності моделі - побудова полігона розподілу прогностичного та фактичного параметрів забруднення повітря. Проводять аналіз полігонів розподілу та роблять висновок об адекватності моделі на цьому етапі. Модель адекватна реальним процесам, коли вірогідності модальних значень P (предиктанта) та $P_{\text{прогн}}$ (отриманого в результаті прогнозу) досить близьки, чи близьки вірогідності високого забруднення P та $P_{\text{прогн}}$.

Проте у практичній роботі зручніше враховувати не значення P , яке очікується, а групу забруднення високе (I), і підвищене (II), знижене (III). Це і було покладено у основу оцінки ефективності прогнозів забруднення повітря у місті.

Третій етап перевірки адекватності моделі - це оцінка справджуваності прогнозів забруднення повітря по місту, яка проводиться згідно таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 - Оцінка справджуваності прогнозів забруднення повітря по місту в цілому

Прогностична група	Градація значень параметру P , при яких прогноз вважається виправданим
--------------------	--

I	$P > 0,35$	$P \geq 0,30$
II	$0,35 \geq P > 0,20$	$0,38 \geq P \geq 0,17$
III	$P \leq 0,20$	$P \leq 0,25$

Критерії для розподілу параметра P на групи та оцінки прогнозів, які представлені у таблиці 1.5 були запропоновані при підготовці матеріалів для впровадження (поглиблення) розроблених методів з урахуванням того що повторність I, II, III груп складає приблизно 10, 40 та 50%. Проте в різних містах та для різних домішок статистичне розподілення P неоднакове, тому іноді можна рекомендувати у I групу записувати $P > 0.30$ чи 10% найбільших значень P . В якості критерію для поділу II та III груп приймається середнє значення параметру P .

Контрольні запитання

1. Як впливає напрям та швидкість вітру на забруднення атмосфери у місті?
2. Які особливості впливу на рівень забруднення атмосфери її термічної стійкості та умов застою повітря?
3. Як впливає температура повітря на рівень забруднення атмосфери?
4. Дати характеристику впливу туманів та опадів на рівень забруднення атмосфери?
5. Які існують статистичні методи прогнозу забруднення атмосфери?
6. У чому полягає фізичний смисл інерційного фактора?
7. Як здійснити вибір предиктанта та предикторів для статистичних схем прогнозу забруднення повітря у місті ?
8. У чому суть методу прогнозу забруднення повітря на основі множинної лінійної регресії?
9. Дати характеристику процедурі перевірки адекватності моделі.

Завдання щодо виконання практичної роботи

1. Вивчити теоретичну частину.
2. Кожен студент повинен отримати у викладача індивідуальний варіант для складання прогнозу забруднення повітря методом лінійного регресійного аналізу. У індивідуальному варіанті вказана

домішка, рік, сезон та предиктант (величина для якої складається прогноз), яким виступає один з показників фонового забруднення (Р чи \tilde{q}).

3. Згідно з отриманим індивідуальним варіантом провести вибірку вихідних даних для заданої шкідливої речовини за вказаний сезон року по восьми стаціонарним постах м. Одеси. Для цього використовують ТЗА-1 за вказаний період. Результати вибірки вихідних даних представити у вигляді таблиці 1.5. Причому необхідно розрахувати показник Р чи \tilde{q} за формулами (1.10 - 1.12), використовуючи виписані значення разових концентрацій на восьми стаціонарних постах з ТЗА-1.
4. На основі табл.1.5 складається зведена таблиця 1.6 середньодобових значень метеорологічних (чи аерологічних) факторів по місту з внесенням також розрахованого за кожну добу показника Р' та Р . Мінімальна кількість векторів-рядків (К) має бути неменша за 35. Зведена табл. 1.6 - це матриця вихідних даних , яка підготовлена для вводу в комп'ютерну програму STEP з урахуванням особливостей роботи цієї програми.
5. Побудувати та проаналізувати графіки залежності предиктанта (Р чи \tilde{q}) від кожного з вибраних предикторів ($T_0, D_0, V_0, F_0, H_1, H_2, H_3, Y_{0-500}, P'$). На кожному малюнку буде К крапок. Зв'язок

може бути будь-який. Треба при аналізі дев'яти кореляційних графіків виявити ті предиктори (чи предиктор) які мають лінійний зв'язок з предиктантом. Зробити висновок о доцільності складання прогнозу забруднення повітря методом лінійного регресійного аналізу.

6. Провести розрахунки параметрів прогностичного рівняння на ЕОМ з використанням спеціалізованої програми STEP, яка реалізує алгоритм МПР.
7. Проаналізувати результати розрахунку для визначення достатньої кількості оптимального числа предикторів, які треба включити в прогностичне рівняння. Для цього треба побудувати графік зміни коефіцієнта множинної кореляції **Rmk**. Причому треба визначити сусідні кроки на яких значення **Rmk** мало (чи зовсім) не відрізняються друг від друга, тоді зупиняємося на попереднім кроці. Зробити висновок.
8. Для вибраного кроку з використанням розрахованих для цього кроку параметрів отримати прогностичне рівняння. Це буде загальний вид лінійного прогностичного рівняння у першому наближенні.
9. Перевірити для отриманого прогностичного рівняння статистичну значущість параметрів моделі. В рівнянні залишаються тільки ті фактори, при яких частинні коефіцієнти регресії пройшли перевірку гіпотези о не значущості с допомогою критерію Стьюдента. Записати прогностичне рівняння в остаточному вигляді.
10. Провести процедуру перевірки адекватності моделі згідно з п.1.6. Зробити висновок.

Приклад розрахунку

1. Приклад розрахунків, складений для прогнозу забруднення атмосфери SO₂ методом лінійного регресійного аналізу в м. Одеса у весняний період. Предиктантом є показник Р.
2. Згідно з варіантом прикладу розрахунку провели вибірку вихідних даних для SO₂ за весняний сезон 1999 року по восьми стаціонарним постах м. Одеси. Для цього використали ТЗА-1 за вказаний період.. Розраховували показник Р за формулою (1.12), використовуючи виписані значення разових концентрацій на восьми стаціонарних постах з ТЗА-1 та склали зведену таблицю А.1. З таблиці видно, що кількість векторів-рядків дорівнює 42, тобто не менш за 35.
3. На основі табл. А.1 склали матрицю вихідних даних, яка у електронному виді має вигляд табл. А.2. Особливості роботи

програми STEP вимагають в перший рядок файлу через пробіл заносити такі дані:

- 1-ше число - кількість стовпчиків матриці вихідних даних (кількість предикторів плюс предиктант - в прикладі 10);
- 2-ге число - кількість векторів-рядків (в прикладі 42);
- 3-тє число - кількість пар напрямів вітру (в прикладі 1);
- 4-тє число - номер стовпчика, де знаходяться значення швидкості вітру (в прикладі 3);
- 5-тє число - номер стовпчика, де знаходяться значення напрямку вітру (в прикладі 2);
- 6-тє число - номер стовпчика, де знаходяться значення верхньої границі приземної інверсії (в прикладі 5), в випадку відсутності приземної інверсії у відповідні позиції заносять значення "0".
- 7-ме число - номер стовпчика, в який заносять значення нижньої границі підвищеної інверсії (у прикладі 6), якщо інверсія відсутня, то у відповідні позиції заносять значення "0";
- 8-ме число - номер стовпчика, в який заносять значення верхньої границі підвищеної інверсії (у прикладі 7), якщо вона відсутня - заносять 0.

З другого рядка до кінця файлу заноситься матриця вихідних даних по рядкам (в кожному рядку - вектор предикторів і значення предиктанту, що йому відповідає). Необхідно, щоб між стовпцями матриці було не менш за один пробіл. Стовпчик предиктанту має бути останнім стовпцем цієї матриці.

4. Побудували 9 графіків залежності предиктанту P від кожного з предикторів ($T_0, D_0, V_0, F_0, H_1, H_2, H_3, Y_{0-500}, P'$). Як приклад, один з графіків зв'язку (P з P') наведений на рис. 1.3 Аналіз дев'яти кореляційних графіків дозволив виявити предиктор, який має лінійний зв'язок з предиктантом P . Цей предиктор - P' (коефіцієнт кореляції між P і P' складає 0,73). Тобто, при складанні прогнозу забруднення повітря можна використовувати метод лінійного регресійного аналізу.
5. Далі провели розрахунки параметрів прогностичного рівняння на ЕОМ з використанням спеціалізованої програми STEP, яка реалізує алгоритм МПР. Результати надано в додатку Б.
6. Проаналізувавши результати розрахунку для визначення достатньої кількості оптимального числа предикторів, побудували графік зміни коефіцієнта множинної кореляції **Rmk** по крокам розрахунку, який наведено на рис. 1.4.

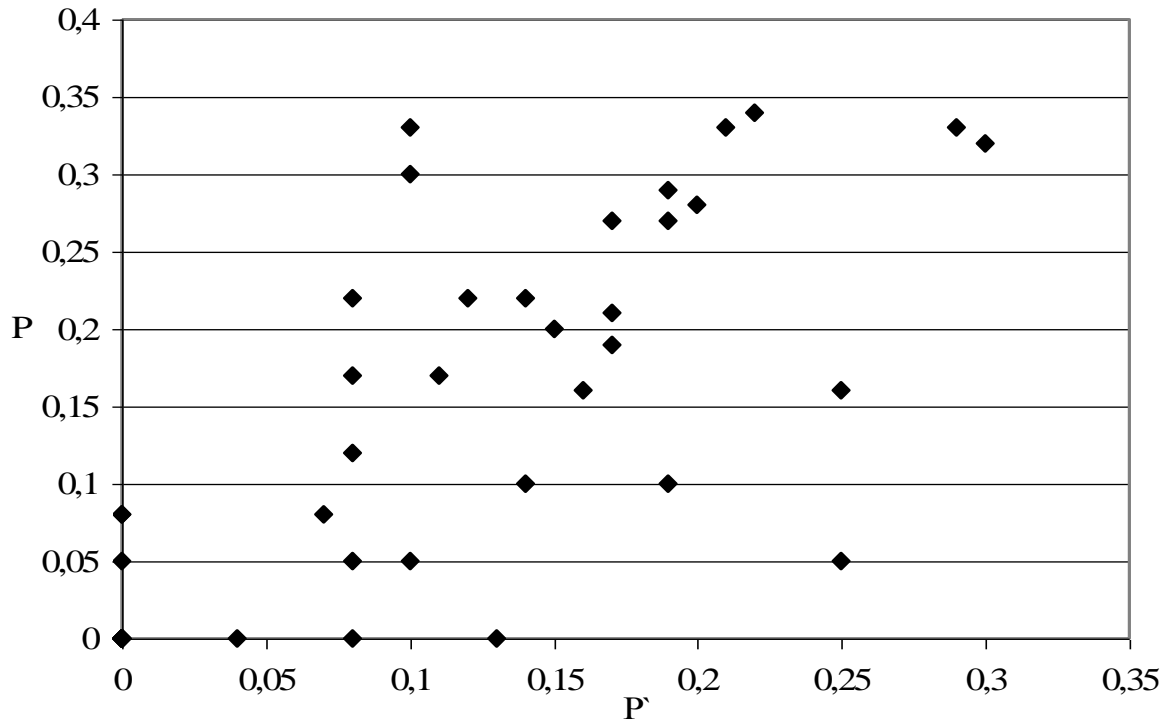


Рисунок 1.3 - Графік зв'язку P з показником P' (коефіцієнт кореляції дорівнює 0,730)

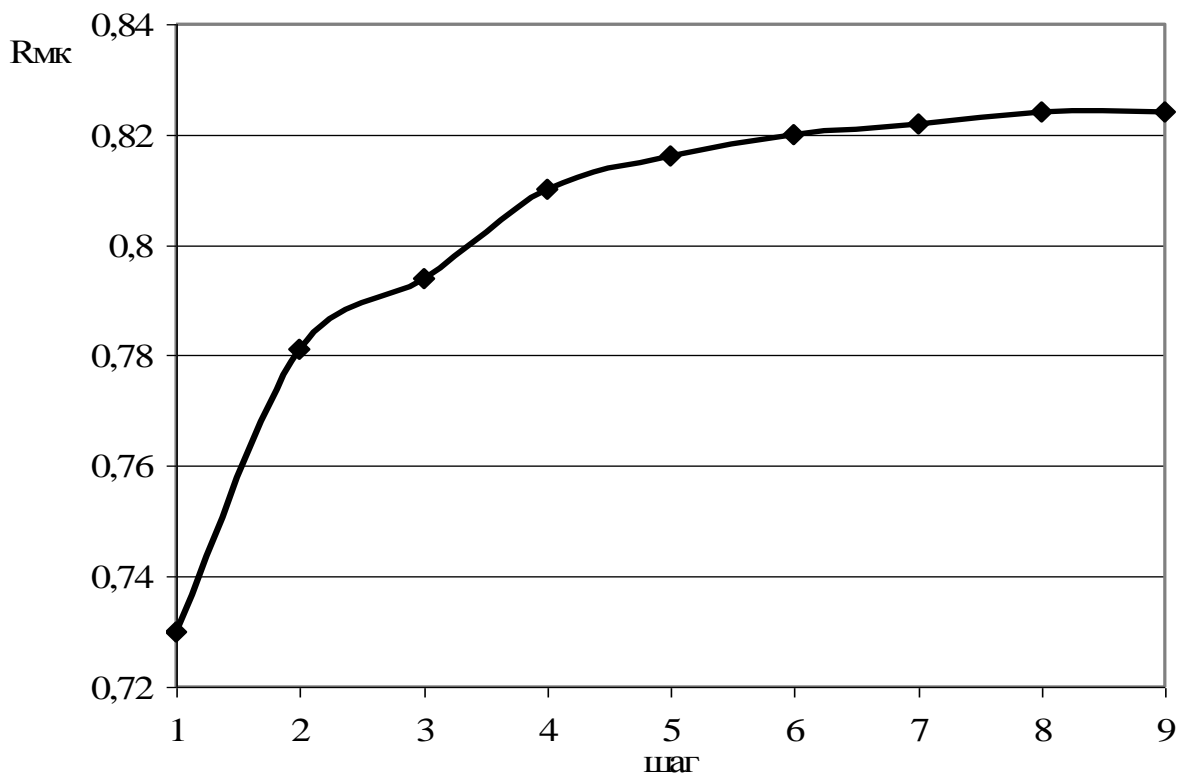


Рисунок 1.4 - Графік зміни множинного коефіцієнту кореляції

Значення **Rmk** мало (чи зовсім) не відрізняються друг від друга на 8-му та 9-му кроці, тому зупиняємось на кроці 8.

7. Результати розрахунків частинних коефіцієнтів регресії, вільного члену і множинного коефіцієнта кореляції на кожному з кроків представлено в таблиці, загальний вигляд якої наведено в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 - Результати розрахунків параметрів прогностичного рівняння

Крок	Коефіцієнти регресії A[i] коло предикторів									Вільний член A [0]	Множинний коефіцієнт кореляції Rmk
1	A1										
2	A1	A2									
3	A1	A2	A3								
4	A1	A2	A3	A4							
5	A1	A2	A3	A4	A5						
6	A1	A2	A3	A4	A5	A6					
7	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7				
8	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8			
9	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9		

8. Для кроку 8 з використанням розрахованих для цього кроку параметрів отримали прогностичне рівняння. Загальний вигляд лінійного прогностичного рівняння у першому наближенні:

$$\hat{P} = 0,536P' + 0,377H_2 + 0,180VV_0 + 0,268F_0 - 0,089\gamma_{0-500} + 0,092T_0 - 0,152H_1 + 0,199H_3 \quad (1.22)$$

9. Перевіривши для отриманого прогностичного рівняння статистичну значущість параметрів моделі за допомогою критерію Стюдента (у прикладі для $n = 42$ і $\alpha = 0,05$ критичне значення критерію $t_{кр}=2,02$)

залишили в рівнянні тільки ті предиктори, при яких частинні коефіцієнти регресії пройшли перевірку гіпотези про незначущість.

Таблиця 1.8 - Характеристика прогностичної моделі на 8-му кроці
($R_{mk} = 0,824$; $A[0] = 9.61 \cdot 10^{-14}$)

Номери предикторів	Коефіцієнт регресії $A[i]$	Критерій Стьюдента $t_a > t_{кр}$	Середнє значення предиктора	Середнє квадратичне відхилення предиктора	Позначення предиктора
9	0,536	5,979	0.109	0.090	P'
6	0,377	3,075	95.091	57.189	H_2
4	0,269	2,990	78.310	14.853	F_0

Прогностичне рівняння у другому наближенні має вигляд:

$$\hat{P} = 0,536P' + 0,377H_2 + 0,268F_0. \quad (1.23)$$

Оскільки в прогностичне рівняння увійшли не усі вісім предикторів кроку 8, то слід зробити уточнення вільного члену a_0 за допомогою формули:

$$A_0 = \frac{\sum (P_i - \hat{P}_i)}{n}, \quad (1.24)$$

де P_i і \hat{P}_i - відповідно фактичне і прогностичне значення предиктанта за i -ту добу сезону.

В наведеному прикладі $A_0 = -0,0014$.

Тоді з врахуванням нового A_0 , остаточний вигляд прогностичного рівняння такий

$$\hat{\hat{P}} = 0,536P' + 0,377H_2 + 0,268F_0 - 0,0014. \quad (1.25)$$

В прогностичне рівняння 1.25 підставили відповідні центровані і нормовані значення предикторів, які наведені у додатку Б.

Результати цього розрахунку наведено у табл. 1.9.

В цій таблиці $\hat{\hat{P}}$ - це прогностичні значення, які пройшли зворотну процедуру центрування і нормування.

Таблиця 1.9 - Результати розрахунку уточненого значення A_0 та прогностичних значень параметра P

Дата	\hat{P}_I	$P_i - \hat{P}_i$	\hat{P}	$\hat{\hat{P}}$
1.03	-0,257	-0,461	-0,258	0,106
4.03	-0,095	-0,623	-0,097	0,125
6.03	0,866	-1,584	0,864	0,242
9.03	0,347	1,256	0,345	0,179
11.03	0,282	0,409	0,281	0,171
14.03	0,619	0,735	0,618	0,212
17.03	0,344	-0,648	0,343	0,179
19.03	0,300	-0,604	0,299	0,173
21.03	-0,429	-0,041	-0,430	0,085
23.03	-0,270	0,546	-0,271	0,104
25.03	1,125	0,561	1,124	0,273
27.03	-0,320	-0,398	-0,322	0,098
29.03	0,271	0,171	0,270	0,170
30.03	0,679	0,592	0,678	0,219
1.04	0,035	0,158	0,033	0,141
3.04	0,837	-0,644	0,835	0,238
5.04	0,714	0,889	0,712	0,223
7.04	-0,557	1,248	-0,559	0,069
9.04	0,732	0,456	0,731	0,225
11.04	1,573	0,030	1,572	0,327
13.04	0,442	0,663	0,440	0,190
15.04	0,071	-1,204	0,070	0,145
17.04	0,440	0,085	0,439	0,190
19.04	0,165	0,940	0,164	0,157
21.04	-0,365	-0,768	-0,367	0,093
22.04	-1,087	-0,046	-1,088	0,005
23.04	-0,906	-0,227	-0,908	0,027
24.04	-0,888	-0,245	-0,890	0,029
25.04	-0,491	-0,642	-0,493	0,077
27.04	0,005	0,603	0,004	0,137
29.04	-0,942	-0,191	-0,944	0,023
5.05	-0,527	0,057	-0,529	0,073
9.05	-0,212	-0,921	-0,213	0,111
13.05	0,207	0,484	0,205	0,162
15.05	-0,014	0,290	-0,015	0,135
19.05	-0,924	-0,209	-0,926	0,025
23.05	1,637	-0,117	1,635	0,335
25.05	-0,942	-0,191	-0,944	0,023
28.05	-0,563	-0,570	-0,565	0,069

10. Останнім етапом роботи є перевірка адекватності моделі у три етапи.

На першому етапі побудували графік зв'язку фактичних та прогностичних значень P , який наведений на рис. 1.5.

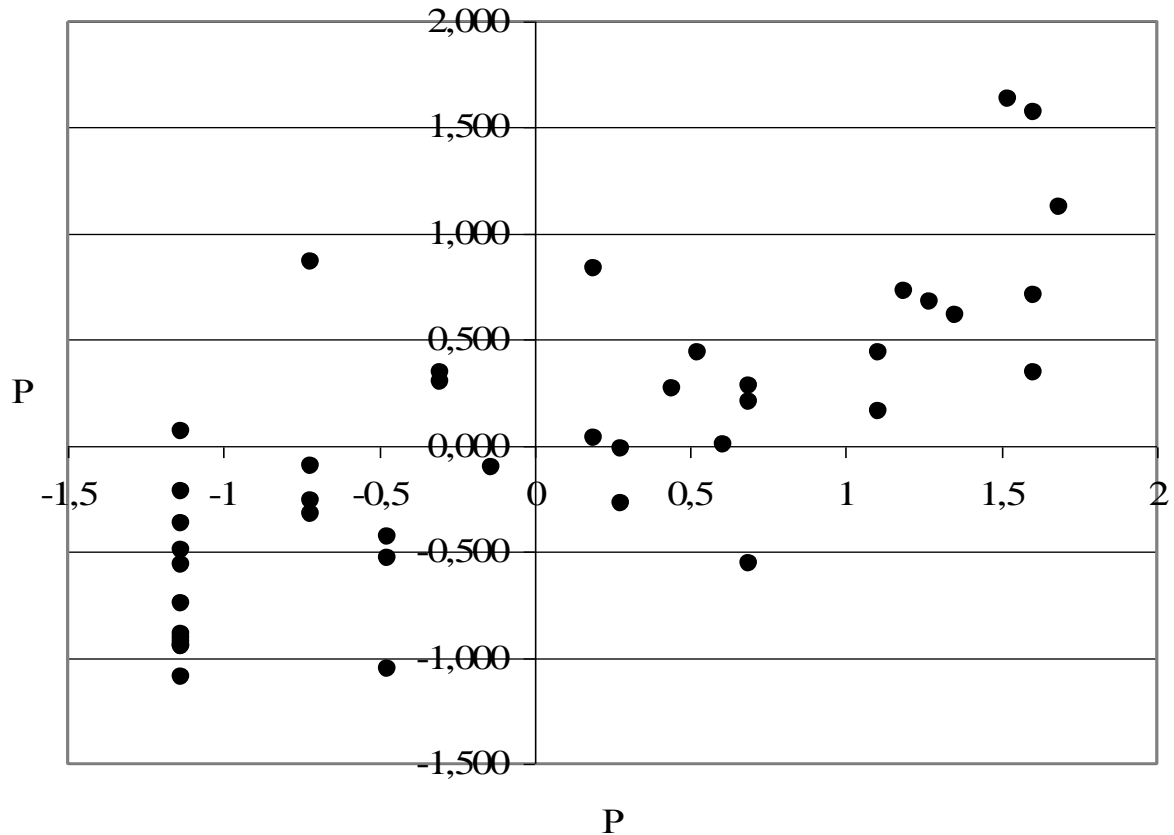


Рисунок 1.5 - Графік зв'язку фактичного і прогностичного значень P

На рис. 1.5 обидва параметри центровані і нормовані. На графіку буде відповідно 42 точки по 42м парам значень P і \hat{P} . Аналіз зовнішнього вигляду графіку зв'язку дозволяє припустити наявність лінійного зв'язку. Це підтверджується значенням розрахованого коефіцієнту кореляції, який складає 0,774. Таким чином, на цьому кроці перевірки модель адекватна реальному процесу.

На другому етапі перевірки адекватності моделі побудували полігон розподілу прогностичного та фактичного параметрів забруднення повітря на основі групованого ряду, параметри якого наведені в табл. 1.10, а сам полігон представлений на рис. 1.6. Проведений аналіз полігонів розподілу дозволяє зробити висновок про неадекватність моделі на цьому етапі, тому що вірогідності модальних значень P (предиктанта) та \hat{P} значно відрізняються як і верогіності високого забруднення.

Таблиця 1.10 - Градації і частоти розподілу фактичного Р і прогностичного значень предиктанту

№	Градації Р і Р	Частота Р	Частота Р
1	-1.133÷-0.781	12	7
2	-0,781÷-0,429	7	6
3	-0,429÷-0,077	3	7
4	-0,077÷0,275	2	7
5	0,275÷0,627	5	7
6	0,627÷0,979	3	5
7	0,979÷1,331	4	1
8	1,331÷1,689	6	2

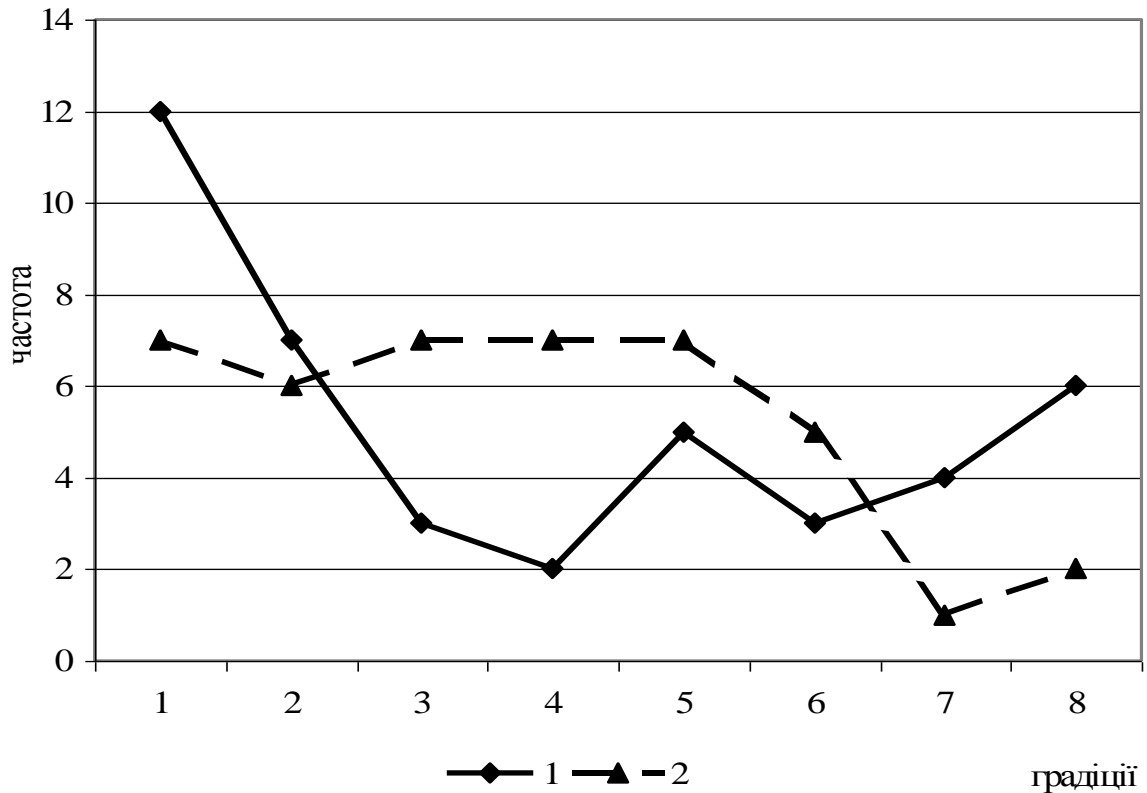


Рисунок 1.6 - Полігони розподілу фактичного (1) та прогностичного (2) значень параметру Р

На третьому перевірки адекватності моделі оцінили справджуваність прогнозів забруднення повітря по місту, яка проводиться згідно таблиці 1.5.

Декілька прикладів реалізації процедури оцінки справджуваності прогнозу наведено у табл 1.11.

Таблиця 1.11 - Результати оцінки справджуваності прогнозу

Дата	\hat{P}	Rфакт	Позначка про справджуваність прогнозу
1.03	0,106	0,05	+
4.03	0,125	0,05	+
6.03	0,242	0,05	+
9.03	0,179	0,33	+

Оцінка справджуваності прогнозів для наведеного прикладу склала 82 %, що дозволяє на цьому етапі модель вважати адекватною.

Оскільки з трьох етапів перевірки адекватності, модель була визнана неадекватною на другому етапі, тоді в цілому модель вважати адекватною не можна.

1.7 Прогнозування забруднення повітря методом розпізнавання образів

Одним із варіантів синоптико-статистичних прогнозів є прогностична схема забруднення повітря методом розпізнавання образів (МРО) [1-5]. Зазвичай у цій схемі як предиктант (величина для якої складається прогноз) виступає один з показників фоновому забруднення (P чи \tilde{q}), а у ролі предикторів (факторів, що впливають на величину предиктанту) - значення метеорологічних характеристик (температури і вологості повітря, швидкості і напрямку вітру, характеристики інверсій тощо) та характеристики рівня забруднення повітря у місті напередодні прогнозу.

Схема прогнозу забруднення повітря методом упізнання образів полягає у визначенні схожості конкретної ситуації з ситуацією, характерною для будь-якої групи забруднення. Схожість ситуацій тут встановлюється по “відстані” між ними. Приймається, що точка прогнозу f у фазовім просторі ситуацій належить до тієї групи, відстань до якої мінімальна.

Під ситуацією розуміють набір характеристик X_1, X_2, \dots, X_n які відповідають рівню забруднення повітря у певний фіксований момент часу. Такими характеристиками можуть бути значення метеорологічних

параметрів і інтегральні характеристики забруднення повітря (наприклад, параметр P' - інтегральна характеристика рівня забруднення в місті за попередню прогнозу добу).

У загальному вигляді залежність предиктанта P від відповідних предикторів має вид:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_L), \quad (1.26)$$

де L - кількість предикторів у конкретній прогностичній схемі.

Або у матричному вигляді (за усі наявні на момент складання прогностичної схеми K діб), причому матриці показників забруднення атмосфери P можна поставити у відповідність матрицю предикторів:

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_K \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} X_{11} X_{12} \dots X_{1L} \\ X_{21} X_{22} \dots X_{2L} \\ \dots \dots \dots \\ X_{K1} X_{K2} \dots X_{KL} \end{bmatrix}. \quad (1.27)$$

Тут L - обмежене й строго постійне число значень предикторів (характеристик ситуації). Передісторія забруднення P' (відома як забруднення “напередодні”) також входить у кількість L предикторів.

Ситуація з деякими характеристиками (предикторами) X_1, X_2, \dots, X_N може бути представлена як крапка у N - вимірному просторі (фазовому просторі ситуацій). Якщо значення рівня забруднення повітря поділити на декілька груп, тоді ситуації у фазовому просторі також поділяться на групи.

Для розбиття на групи зазвичай використовують традиційний розподіл параметра P на групи високого, відносно підвищеного і відносно зниженого забруднення. Їх характеристика приведена у табл.1.3. В залежності від значень P ситуація може бути віднесена до однієї із трьох основних груп, причому межа між 1 и 2 групами може бути прийнята, як 0,30, так і 0,35 або 0,25 (це визначається загальним станом забруднення повітряного басейну міста) :

- **1 група** – відповідає значному вмісту домішок у повітрі;
- **2 група** – відповідає середньому вмісту домішок у повітрі;
- **3 група** – відповідає малому вмісту домішок у повітрі.

При прогнозі забруднення повітря МРО треба встановити схожість ситуації, для якої складається прогноз, з однією з груп забруднення. Схожість ситуацій устанавлюється по "відстані" між ними.

Під відстанню від точки прогнозу \mathbf{f} до групи $\mathbf{1}$ приймається відстань від \mathbf{f} до центру ваги цієї групи, тобто до точки з координатами :

$$M_i^1 = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K X_{ij}, \quad (1.28)$$

де підсумовування проводиться по всім K значенням кожного i -того предиктора, що входить до групи $\mathbf{1}$, а M_i^1 - середнє значення i -ої характеристики (предиктора) у цієї групи.

Тоді "відстань" від точки \mathbf{f} до центру ваги групи $\mathbf{1}$ визначається:

$$\rho_1^2 = \sum_{i=1}^L \left[\frac{(X_{ij} - M_i^1)^2}{(D_i^1)^2} \right], \quad (1.29)$$

де у знаменнику - дисперсії кожного предиктора, які розраховуються по формулі (1.30):

$$(D_i^1)^2 = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (X_{ij} - M_i^1)^2. \quad (1.30)$$

де $j = \overline{1, M}$ - перебір по усіх точках кожного предиктора;

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

Аналогічно визначається відстань від \mathbf{f} до груп $\mathbf{2}$ і $\mathbf{3}$.

Приймається, що точка \mathbf{f} у фазовім просторі ситуацій належить до тієї групи, відстань до якої мінімальна.

У цій схемі прогностична значущість предикторів визначається відмінністю як їх середніх значень (M), так і дисперсій (D). Дисперсії предикторів дозволяють під час прогнозу додатково враховувати реальний характер залежностей між забрудненням повітря та метеорологічними умовами.

Перевагами методу розпізнавання образів є кращий, ніж у методі лінійної регресії, облік реального характеру зв'язків між показниками

забруднення повітря і метеорологічними умовами. Але при складних зв'язках (наприклад, наявність двох максимумів забруднення повітря в залежності від метеорологічних факторів) до однієї групи забруднення будуть віднесені істотно різні ситуації і як наслідок - різні значення предикторів. Тому при використанні поданого методу найкраще вибирати такі предиктори, з якими зв'язок забруднення повітря є монотонний.

Прогностична схема МРО ефективна як на залежному (на якому проводився етап вивчення), так і на незалежному матеріалі. Із літературних джерел [2-6] відомо, що справджуваність складає відповідно 73-75% і 70%.

Контрольні запитання

1. У чому суть методу прогнозу забруднення атмосфери методом розпізнавання образів?
2. Дати характеристику предикторам та предиктанту, які зазвичай використовуються у прогностичних схемах при використанні МРО.
3. Що розуміють під "ситуацією" про прогнозі МРО?
4. Що розуміють під "відстанню" про прогнозі МРО?
5. Які має переваги МРО?
6. Які має недоліки МРО?

Завдання для практичної роботи

1. Уважно вивчити теоретичну частину роботи.
2. Для складання прогнозу забруднення повітря методом розпізнавання образів кожен студент використовує тіж самі вихідні данні індивідуального варіанту, який отримав при виконанні попередньої роботи.
3. Використовуючи раніш отриману зведену таблицю А.1 вихідні дані (42 ситуації) по значенню предиктанта слід розбити на три (для Р) або чотири групи (для \tilde{q}).
4. Для кожної із трьох (чотирьох) груп по усій кількості предикторів обчислюється середнє значення за формулою (1.28), та дисперсії кожного предиктора по формулі (1.30). Результати розрахунків представити у табличному вигляді згідно з табл. 1.12.
5. Використовуючи отримані значення центрів ваги (середніх значень предикторів) і дисперсій предикторів, розрахувати по кожній добі

сезону (по кожному повному вектору-рядку) для показника P - відстані R_1^2 , R_2^2 і R_3^2 , або для показника \tilde{q} - R_1^2 , R_2^2 , R_3^2 і R_4^2 .

6. Результати розрахунків відстаней викласти у вигляді табл. 1.13, в якій також для кожної доби треба визначити прогностичну групу забруднення, вказати фактичну групу забруднення і за допомогою спеціальної позначки („+” або „-”) вказати, чи справдився прогноз забруднення атмосфери з цю добу.

7. Визначити загальну справджуваність прогнозу. Якщо потрібно, таким же чином оцінити справджуваність прогнозу у кожній групі забруднення. Скласти висновок.

8. Усі результати розрахунків, коментарі до них і висновок викласти у вигляді письмового звіту.

Приклад розрахунків

Побудувати прогноз забруднення атмосфери домішкою за вихідними даними, наданими в табл. А.2.

Вихідні дані відповідно до значень предиктанта P поділяють на три групи. До першої групи належать ситуації, в котрих $P \geq 0,30$ (високий рівень забруднення). До другої групи належать ситуації, для котрих P приймає значення $0,2 \leq P < 0,30$ (відносно підвищений), а до третьої групи вектори зі значеннями $P < 0,20$ (відносно підвищений рівень забруднення). Як наслідок отримуємо три матриці, які мають вигляд:

$P \geq 0,30$								
22,4	20	5	96	0	1070	1440	0,1	0,1
1	150	2	91	0	1620	1750	0,18	0,1
13,5	350	2	60	0	2150	2230	0,06	0,22
9,3	10	4	84	50	960	1070	0,32	0,21
12,3	30	5	54	0	2360	2560	0,12	0,29
18	90	2	78	0	1710	1920	0,16	0,3
$0,2 \leq P < 0,30$								
0,6	40	4	96	0	610	780	0,36	0,14
10,7	330	3	89	0	0	0	0,06	0,19
8,5	20	6	62	0	810	900	-0,06	0,08
11,9	340	6	62	0	1680	1890	0,06	0,2
8	160	2	92	0	690	910	0,08	0,17
7,3	180	2	100	0	650	670	0,02	0,15
12,8	290	3	54	0	1130	1990	-0,1	0,19
19	90	2	66	0	740	910	-0,22	0,17
19,2	170	3	86	0	0	0	-0,16	0,12

P<0,20

-3,4	100	2	100	500	0	0	0,24	0
-1,3	90	3	100	0	290	750	0,24	0,1
0,4	80	3	100	0	390	760	-0,34	0,25
1,4	120	4	87	300	0	0	0,88	0,14
5,7	350	3	68	0	0	0	0,62	0,19
11,1	340	4	75	0	740	810	0,14	0,07
6,7	350	3	90	0	480	610	0,68	0,08
11	180	3	70	280	0	0	-0,04	0,08
10,3	180	5	73	110	0	0	0,3	0,17
7,7	150	4	72	0	710	800	0,04	0,16
7	140	3	90	80	620	750	0,14	0,25
6,8	150	3	96	0	380	420	0,58	0,13
7	150	3	91	0	670	700	-0,34	0,04
10,4	270	3	54	90	0	0	0,96	0
18	140	2	64	0	0	0	0,72	0
17,7	80	2	65	0	0	0	0,42	0
13,7	120	2	87	160	0	0	-0,12	0
21,7	160	3	62	0	0	0	0	0
22,9	230	3	56	0	0	0	0,32	0
17,9	90	6	85	550	0	0	0,48	0
19,6	320	3	82	190	0	0	0,02	0,08
20,5	90	2	76	0	0	0	0,8	0,08
16,5	160	3	95	0	460	520	0,28	0,11
18,6	350	4	73	0	0	0	0,33	0
18,5	360	3	63	0	0	0	0,17	0
21,8	80	1	62	0	0	0	0,22	0
20,5	170	3	83	0	0	0	0,29	0

Аналіз груп предикторів для кожного з класів забруднення показав, що предиктор H_1 доцільно виключити з прогностичної схеми, оскільки у першій групі забруднення ($P \geq 0,30$) тільки одне значення показника відрізняється від 0, а у другій групі ($0,2 \leq P < 0,30$) усі значення показника дорівнюють 0.

Отже, для інших предикторів по кожній групі визначають центр ваги цієї групи, тобто точку з координатами, які визначають за формулою 1.28. За формулою 1.30 визначають дисперсії кожного предиктора для 1, 2 і 3 груп забруднення. Результати розрахунків центрів ваги і дисперсій для кожної групи забруднення занесено в табл. 1.13.

Таблиця 1.13 – Результати розрахунків центру ваги і дисперсії предикторів 1,2 і 3 груп фонового забруднення (м. Одеса, весна, 1999 рік, SO₂)

Група	Показник	Предиктори							
		T ₀	D ₀	V ₀	F ₀	H ₂	H ₃	Y ₀₋₅₀₀	P [*]
1	M ₁	12,8	108,3	3,3	77,2	1645,0	1828,3	0,157	0,203
1	D ₁ ²	54,28	16816,67	2,27	284,97	314190,00	287416,67	0,0082	0,0077
3	M ₂	10,9	180,0	3,4	78,6	701,1	894,4	0,004	0,157
2	D ₂ ²	34,05	14250,00	2,53	302,28	268711,11	481927,78	0,0289	0,0015
3	M ₃	12,2	185,2	3,1	78,5	175,6	226,7	0,297	0,071
3	D ₃ ²	59,776	9572,08	0,99	199,72	72133,333	112323,08	0,1154	0,0065

Далі складають прогноз для 42 ситуацій вихідних даних. Для цього необхідно провезти розрахунок відстаней від прогнозованої точки до групи забруднення (до центру ваги відповідної групи).

Для цього за формулою 1.29 за допомогою значень центрів ваги і дисперсій, наведених в табл. 1.10 для кожної доби досліджуваного сезону розраховують три відстані. Відповідно до вихідних даних для 1, 2 і 3 груп відстані мають розраховуватися так:

$$\begin{aligned}
 R_1^2 &= \sum_{i=1}^L \frac{(X_{0j} - M_i^1)^2}{(D_i^1)^2} = \frac{(T_{0j} - \bar{T}^1)^2}{(D_T^1)^2} + \frac{(DD_{0j} - DD\bar{D}^1)^2}{(D_{DD}^1)^2} + \\
 &+ \frac{(VV_{0j} - V\bar{V}^1)^2}{(D_{VV}^1)^2} + \frac{(F_{0j} - \bar{F}^1)^2}{(D_F^1)^2} + \frac{(H_{2j} - \bar{H}_2^1)^2}{(D_{H2}^1)^2} + \frac{(H_{3j} - \bar{H}_2^1)^2}{(D_{H3}^1)^2} + \\
 &+ \frac{(\gamma_{0-500j} - \bar{\gamma}_{0-500}^1)^2}{(D_\gamma^1)^2} + \frac{(P_j - \bar{P}^1)^2}{(D_{P^*}^1)^2}. \\
 R_2^2 &= \sum_{i=1}^L \frac{(X_{0j} - M_i^2)^2}{(D_i^2)^2} = \frac{(T_{0j} - \bar{T}^2)^2}{(D_T^2)^2} + \frac{(DD_{0j} - DD\bar{D}^2)^2}{(D_{DD}^2)^2} + \\
 &+ \frac{(VV_{0j} - V\bar{V}^2)^2}{(D_{VV}^2)^2} + \frac{(F_{0j} - \bar{F}^2)^2}{(D_F^2)^2} + \frac{(H_{2j} - \bar{H}_2^2)^2}{(D_{H2}^2)^2} + \frac{(H_{3j} - \bar{H}_2^2)^2}{(D_{H3}^2)^2} + \\
 &+ \frac{(\gamma_{0-500j} - \bar{\gamma}_{0-500}^2)^2}{(D_\gamma^2)^2} + \frac{(P_j - \bar{P}^2)^2}{(D_{P^*}^2)^2}. \\
 R_3^2 &= \sum_{i=1}^L \frac{(X_{0j} - M_i^3)^2}{(D_i^3)^2} = \frac{(T_{0j} - \bar{T}^3)^2}{(D_T^3)^2} + \frac{(DD_{0j} - DD\bar{D}^3)^2}{(D_{DD}^3)^2} + \\
 &+ \frac{(VV_{0j} - V\bar{V}^3)^2}{(D_{VV}^3)^2} + \frac{(F_{0j} - \bar{F}^3)^2}{(D_F^3)^2} + \frac{(H_{2j} - \bar{H}_2^3)^2}{(D_{H2}^3)^2} + \frac{(H_{3j} - \bar{H}_2^3)^2}{(D_{H3}^3)^2} + \\
 &+ \frac{(\gamma_{0-500j} - \bar{\gamma}_{0-500}^3)^2}{(D_\gamma^3)^2} + \frac{(P_j - \bar{P}^3)^2}{(D_{P^*}^3)^2}.
 \end{aligned}$$

Наприклад, при складанні прогнозу для першого вектора (1.03.1999 р) відстані розраховуватимуться таким чином:

$$R_1^2 = \frac{(-3,4 - 12,8)^2}{54,28} + \frac{(100 - 108,3)^2}{16816,67} + \frac{(2 - 3,3)^2}{2,27} + \frac{(100 - 77,2)^2}{284,97} +$$

$$+ \frac{(0 - 1645,0)^2}{314190,00} + \frac{(0 - 1828,3)^2}{287416,67} + \frac{(0,24 - 0,157)^2}{0,0082} + \frac{(0 - 0,203)^2}{0,0077} =$$

$$= 33,84$$

$$R_2^2 = \frac{(-3,4 - 10,9)^2}{34,05} + \frac{(100 - 180,0)^2}{14250,00} + \frac{(2 - 3,4)^2}{2,53} + \frac{(100 - 78,6)^2}{302,28} +$$

$$+ \frac{(0 - 701,1)^2}{268711,11} + \frac{(0 - 894,4)^2}{481927,78} + \frac{(0,24 - 0,004)^2}{0,0289} + \frac{(0 - 0,157)^2}{0,0015} =$$

$$= 30,59$$

$$R_3^2 = \frac{(-3,4 - 12,2)^2}{59,776} + \frac{(100 - 185,2)^2}{9572,08} + \frac{(2 - 3,1)^2}{0,99} + \frac{(100 - 78,5)^2}{199,72} +$$

$$+ \frac{(0 - 175,6)^2}{72133,333} + \frac{(0 - 226,7)^2}{112323,08} + \frac{(0,24 - 0,297)^2}{0,1154} + \frac{(0 - 0,071)^2}{0,0065} =$$

$$= 10,05$$

Коли розрахунки зроблено для усіх векторів (усіх діб досліджуваного сезону), заповнюють табл. 1.14

Таблиця 1.14 – Результати розрахунку відстаней від точки прогнозу до трьох груп забруднення і оцінка справджуваності прогнозу

№ п/п	Дата	R_1^2	R_2^2	R_3^2	Прогностична група забруднення	Фактична група забруднення	Справд-жуваність (да/ні)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.03	33,84	30,59	10,05	3	3	+

Оскільки в прикладі найменшою є відстань від точки прогнозу (1.03.1999 р.) до третьої групи забруднення, тому для цього вектора слід дати прогноз - третя група, а у колонку № 6 записують 3.

Оскільки відповідно до вихідних даних 1.03.1999 р. фактичне значення $P = 0,05$, тобто група забруднення була 3 – у колонку № 7 записують 3. Оскільки прогностична і фактична групи забруднення співпадають (у колонках № 6 і № 7 однакові значення), то прогноз

справдився і у колонці № 8 проставляють символ „+”. Якщо б у колонках № 6 і № 7 знаходилися різні значення (прогностична і фактична групи забруднення відрізнялися), то в колонці № 8 слід було б проставити символ „-”.

Щоб визначити справджуваність прогнозу, слід скласти пропорційне рівняння, в якому кількість векторів-рядків (у прикладі 42) - 100 %, а кількість випадків прогнозу, який справдився (кількість символів „+” у колонці № 8) – це X відсотків.

Якщо справджуваність прогнозу складає 70-75 %, то прогностична схема є адекватною, а отриману модель прогнозу забруднення атмосфери можна рекомендувати до практичного впровадження.

Перелік посилань

1. Полетаєва Л.М., Юрасов С.М., Ільїна В.Г. Конспект лекцій з дисципліни “Моделювання та прогнозування стану довкілля” для студентів спеціальності “Екологія та охорона навколишнього середовища”. - Одеса: ОДЕКУ, 2003. - 150 с.
2. Методические указания к выполнению практической работы “Построение статистической модели прогноза загрязнения атмосферы” / Укл. І.Д. Лосєва, Л.М. Полетаєва та ін. - Одеса: ОГМИ, 1995. - 18 с.
3. Методичні вказівки до виконання курсового проекту “Прогнозування забруднення атмосфери методом розпізнавання образів” / Укл. Полетаєва Л.М., Чернякова О.І. - Одеса: ОДЕКУ, 2002. - 65 с.
4. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы.-Л.: Гидрометеиздат, 1985.- 272 с.
5. Владимиров Ф.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г. Охрана окружающей среды - Л.: Гидрометеиздат, 1991.- 424 с.
6. Генихович Е.Л., Гуцин В.А., Сонькин Л.Р. О возможности прогноза загрязнения воздуха методом распознавания образов // Труды ГГО.- 1973. Вып. 293. - С.21-25.
7. Себастьян Г.С. Процессы принятия решений при распознавании образов.- Киев: Техника, 1965.
8. Сонькин Л.Р. Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы - Л.: Гидрометеиздат, 1991 - 224 с.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

2.1 Побудова режимної функції і прогноз висоти хвиль

2.1.1 Основні положення

Режимна функція висоти хвиль, як випадкової величини, являє собою закон її розподілення в часі. Вона дозволяє знайти забезпеченість F_p (імовірність перевищення) заданого значення висоти хвиль і навпаки: по заданій частоті оцінити висоту хвиль. У цій функції висота характеризує не тільки енергію хвилі, але й силу шторму, тобто режимна функція практично дозволяє оцінити частоту виникнення штормів різної сили.

Крім режимної забезпеченості висоти хвиль існує поняття їхньої системної забезпеченості. Будь-який шторм - це система хвиль, у якій їхня висота являє собою випадкову величину з деяким законом розподілення. На цей час параметри цього розподілення визначені. Вони залежать від співвідношення середньої довжини хвиль і глибини ділянки водного об'єкта, на якому спостерігається розглянуте хвилювання. Значення перехідних коефіцієнтів k_c від середньої висоти хвиль у системі (у штормі) до деякої висоти із забезпеченістю F_c для різних умов представлені в табличній формі [2]. По суті справи висота хвилі з будь-якою забезпеченістю в системі може бути використана, як характерна для шторму. На практиці найчастіше розглядають середнє значення висоти хвиль і із забезпеченістю 5, 3, 1, 0,1% у системі.

Режимна функція будується за середнім значенням висоти хвиль у випадку, якщо вона розраховується за даними спостережень за швидкістю вітру. При побудові режимної функції за даними спостережень за хвилюванням, як характерна виступає $h^{(3)}$ (значення висоти хвиль із забезпеченістю 3% у системі), оскільки теоретично вважається, що відповідно до методики проведення спостережень за хвилюванням на гідрологічних постах результати спостережень мають 3%-ву забезпеченість у системі.

Прогнозування режиму хвилювання виконується в такий спосіб:

- за даними спостережень будується режимна функція для характерної висоти хвиль h ;
- потім по частоті 1 раз в n років ($1/n$) розраховують відповідну їй забезпеченість F_p і по режимній функції знаходять значення висоти хвиль h_p з відповідною частотою в режимі;
- по h_p і відповідному перехідному коефіцієнту k_c (табл. 2.1.1) знаходять $h_p^{(c)}$ значення висоти хвиль із забезпеченістю F_c у системі.

Режимні функції висоти хвиль можуть бути побудовані по восьми румбах: З, ПнС, С, ПдС, Пд, ПдЗ, З та ПнЗ. Однак розглядаються при

прогнозуванні не всі ці напрямки, а тільки хвиленебезпечні, тобто ті, у яких спостерігається найбільша довжина розгону хвиль і найбільш часті й сильні вітри.

Таблиця 2.1.1 – Перехідні коефіцієнти k_C (для $H / \lambda \geq 0,5$, де H - середня глибина акваторії; λ - середня довжина хвиль)

$F_C, \%$	45,7	13	5	3	1	0,1
k_C	1,00	1,61	1,94	2,10	2,40	2,94

Примітка: Середня висота хвиль має забезпеченість 45,7% в системі.

2.1.2 Побудова режимної функції

Побудова режимної функції виконується в такий спосіб.

а) Для кожного хвиленебезпечного напрямку діапазон можливих значень висоти хвиль розбивається на інтервали (наприклад, як у табл. 2.1.2) і за результатами спостережень підраховується кількість випадків m_i попадання значень висоти хвиль на розглянуті інтервали й загальну кількість випадків хвилювання розглянутого напрямку $n_H = \sum m_i$.

б) Далі розраховується імовірність $p_i(\%)$ попадання на інтервали й імовірність напрямку $P_H(\%)$ по формулах:

$$p_i = 100 m_i / N \quad \text{й} \quad P_H = 100 n_H / N, \quad (2.1.1)$$

де N - загальна кількість спостережень в усіх напрямках.

в) Для лівої межі інтервалів визначається безумовна забезпеченість F_{Bi} шляхом підсумовування p_i у порядку убутання значень висоти хвиль (табл. 2.1.2) і умовна забезпеченість F_{Pi} за формулою:

$$F_{Pi} = 100 F_{Bi} / P_H. \quad (2.1.2)$$

Значення F_{Pi} називається умовним, оскільки характеризує забезпеченість висоти хвиль за умови, коли спостерігається хвилювання розглядуваного напрямку (імовірність напрямку береться за 100%).

г) За значеннями лівої межі інтервалів h_i і відповідним їм значенням F_{Pi} будується графік зв'язку $F_P = f(h)$ (рис. 2.1.1).

При побудові зв'язку $F_P = f(h)$ припускають, що h_i розподілені за законом Вейбула. Тому для вирівнювання даної залежності використовується клітчатка (рис. 2.1.2).

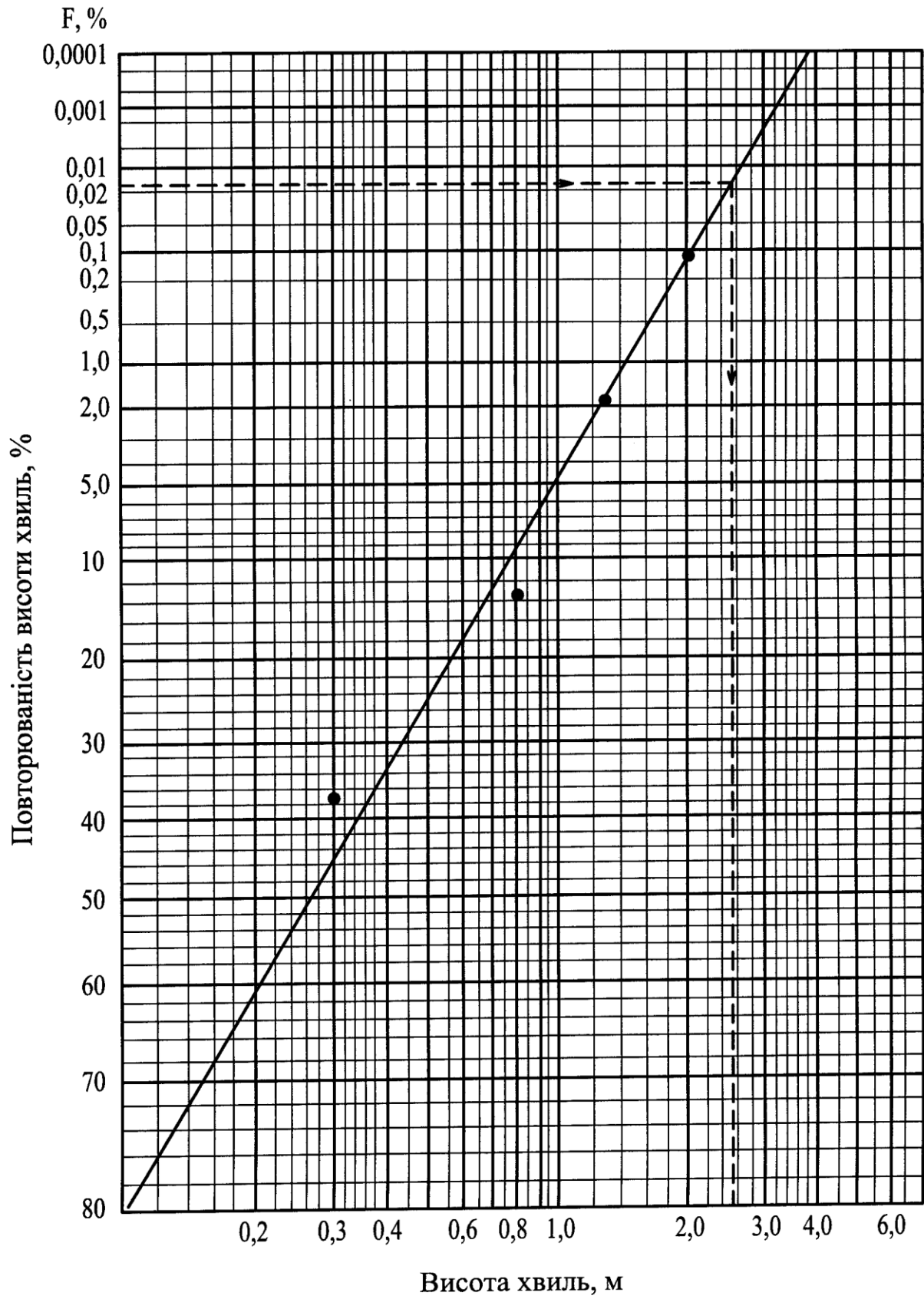


Рис. 2.1.1 Режимна функція висоти хвиль східного напрямку

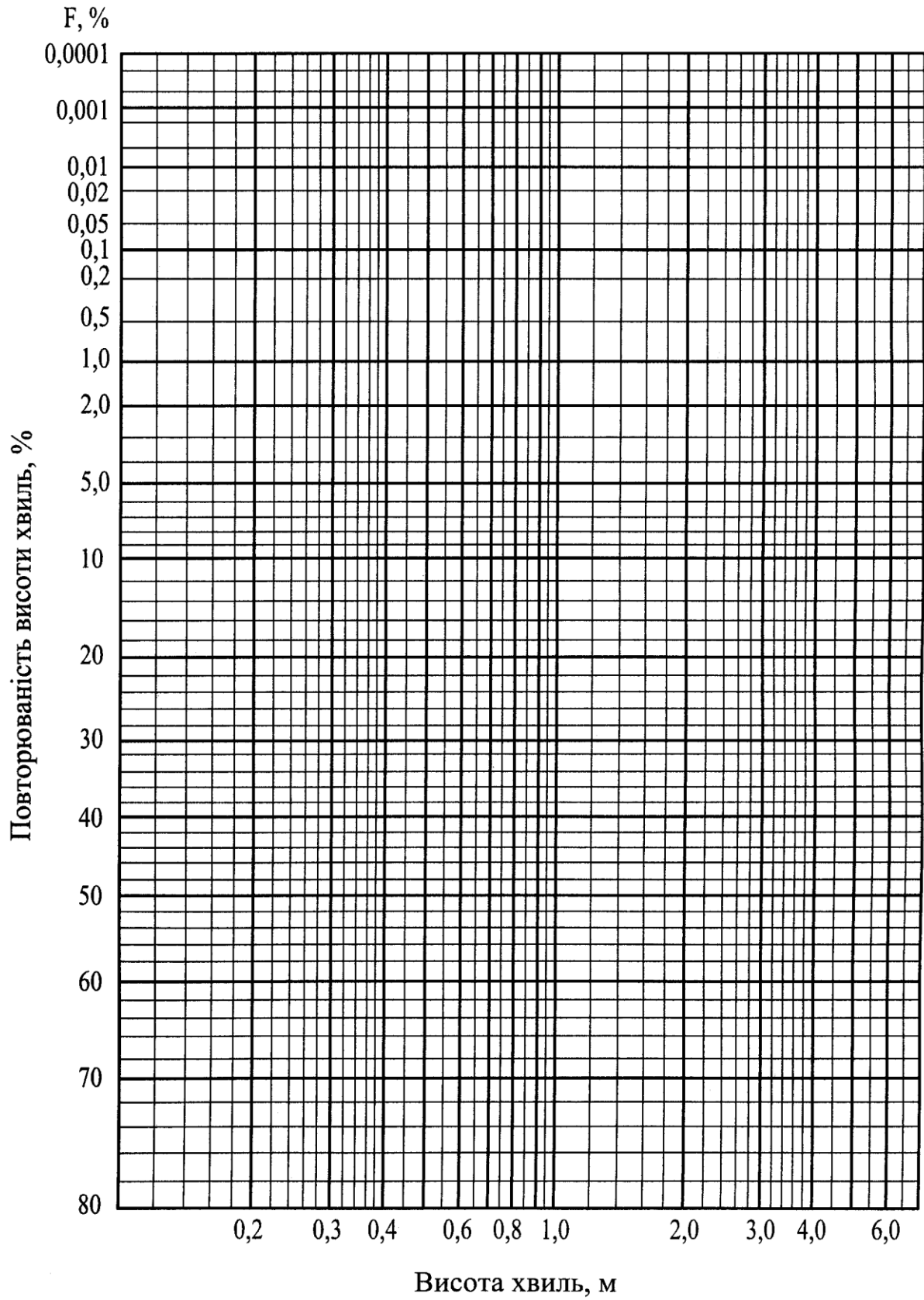


Рис. 2.1.2 Клітчатка імовірностей Вейбула

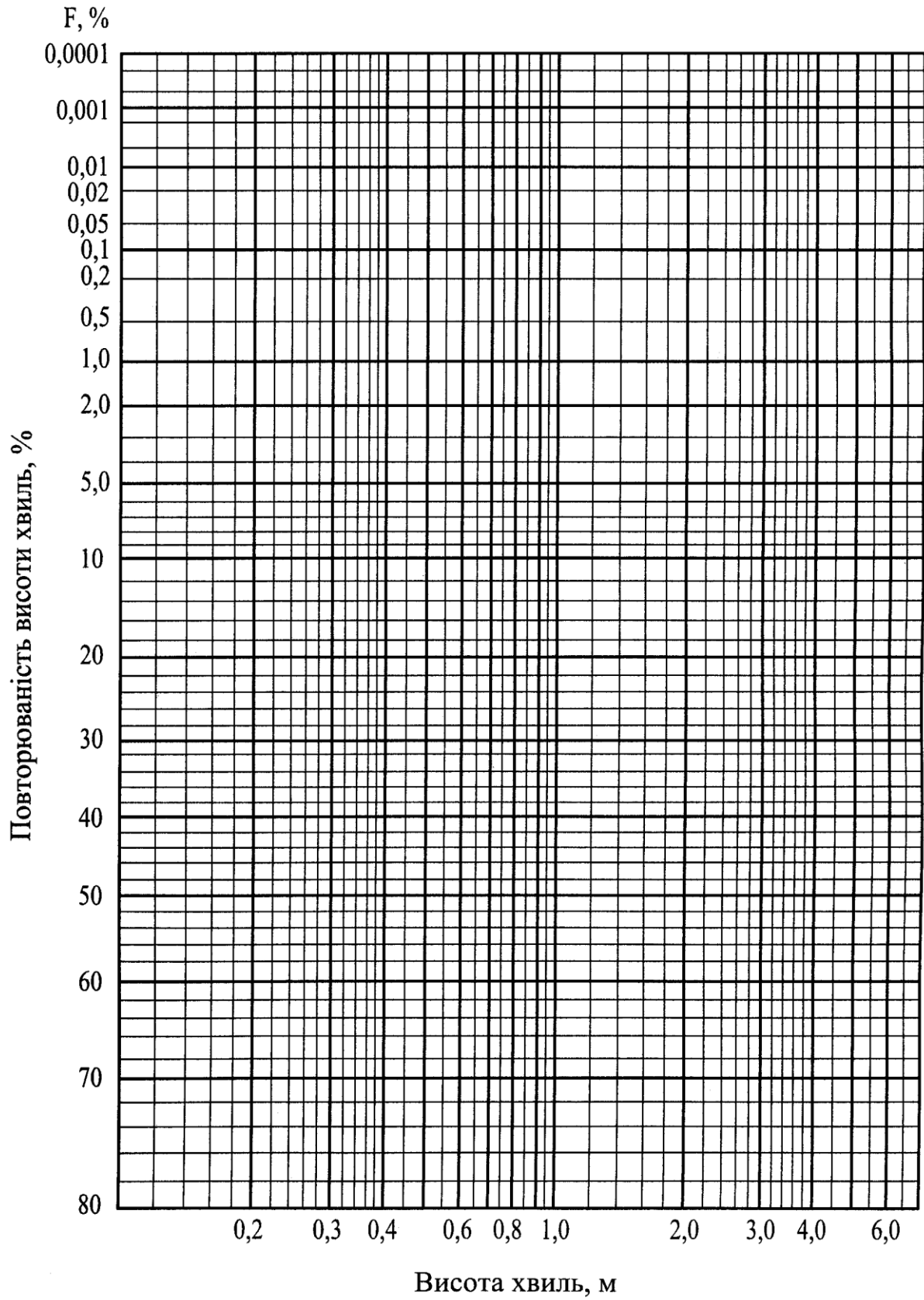


Рис. 2.1.2 Клітчатка імовірностей Вейбула

2.1.3 Прогнозування режиму хвилювання

Прогноз характерної висоти хвиль із частотою 1 раз на n років виконується по побудованій режимній функції. Для цього:

- необхідна частота 1/n перераховується [14] у відповідну забезпеченість $F_p(\%)$ за формулою

$$F_p = 100 \Delta t_{шт} / (T_B n P_H), \quad (2.1.3)$$

де $\Delta t_{шт}$ – середня тривалість шторму, діб (за відсутності спостережень для морів дорівнює 0,5 діб, для океанів - 0,75 діб);

T_B – середня тривалість безльодового періоду, діб;

P_H – імовірність розглянутого напрямку (у частках від одиниці);

- по F_p і по режимній функції знаходять значення висоти хвиль h_p з відповідною частотою в режимі;

- для переходу від характерної до необхідної висоти хвиль у системі використовуються перехідні коефіцієнти k_C (табл. 2.1.1)

Контрольні запитання

1. Що характеризує режимна забезпеченість хвилювання?
2. Що характеризує системна забезпеченість хвилювання?
3. Яку забезпеченість у системі мають висоти хвиль, які є результатом спостережень на гідрологічних постах?
4. По яким напрямкам можуть бути побудовані режимні функції висоти хвиль?
5. Як виконується прогнозування режиму хвилювання?
6. Як виконується побудова режимної функції висоти хвиль?
7. Як розраховують висоту хвиль з необхідною забезпеченістю в системі?

Завдання для самостійної роботи

За даними спостережень на ГМС для східного напрямку (табл. 2.1.2) визначити висоту хвиль із повторюваністю 1 раз на 50 років (2% у режимі) і забезпеченістю в системі 1%.

Таблиця 2.1.2 - Дані про режим хвилювання (загальна кількість спостережень дорівнює 13036)

$h_{3\%}, \text{ м}$	Повторюваність висот хвиль по варіантах									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
<0,5	773	734	494	1440	1143	698	709	1308	812	400

0,5-1,0	454	465	297	575	614	402	289	795	400	280
1,1-1,5	113	189	125	133	95	139	87	99	150	115
1,6-2,0	18	52	44	26	18	80	13	18	50	50
2,1-2,5	4	26	13	8	3	12	3	7	23	14
2,6-3,0	1	9	6	2	1	2	1	4	8	3
3,1-3,5		4	2	1		1		1	3	1
>3,5		1							1	
Σ	1363	1480	981	2185	1874	1334	1103	1460	1447	863

Приклад побудови режимної функції висоти хвиль

ВИХІДНІ ДАНІ. Потрібно за даними спостережень на ГМС для східного напрямку (табл. 2.1.3) визначити висоту хвиль із повторюваністю 1 раз на 50 років (2% у режимі) і забезпеченістю в системі 1%. Тривалість безльодового періоду (Т_б) - 310 діб.

Таблиця 2.1.3 - Дані режиму хвилювання по ГМС Анапа (загальна кількість спостережень - 13036)

i	Висота хвиль $h_i^{(3)}$, м	Повторюваність висоти хвиль східного напрямку			
		Кількість випадків m_i	p_i , %	F_{Bi} , %	F_{Pi} , %
1	≤ 0,25	1541	11,82	18,81	100
2	0,3-0,75	580	4,45	6,99	37,2
3	0,8-1,25	284	2,18	2,54	13,5
4	1,3-2,00	44	0,34	0,36	1,91
5	> 2,00	3	0,02	0,02	0,106
	Σ	n = 2452	P_n = 18,81		

РІШЕННЯ.

1. Діапазон можливих значень висоти хвиль розбиваємо на інтервали й підраховуємо: кількість випадків влучення на них m_i (табл. 2.1.3); загальна кількість спостережень $N = 13036$; кількість спостережень хвилювання східного напрямку $n_H = 2452$.

2. Визначаємо p_i й P_H :

$$p_1 = 100 * 1541 / 13036 = 11,82(\%);$$

$$p_2 = 100 * 580 / 13036 = 4,45(\%);$$

.....

$$p_5 = 100 * 3 / 13036 = 0,02(\%);$$

$$P_H = 100 * 2452 / 13036 = 18,81(\%).$$

3. Знаходимо безумовну забезпеченість F_{B1} лівих меж інтервалів висоти хвиль:

$$F_{B5} = 0,02(\%);$$

$$F_{B4} = 0,02 + 0,34 = 0,36(\%);$$

$$F_{B3} = 0,36 + 2,18 = 2,54(\%);$$

$$F_{B1} = 6,99 + 11,82 = 18,81(\%).$$

4. Розраховуємо умовну забезпеченість згаданих меж:

$$F_{P1} = 100 * 18,81/18,81 = 100(\%);$$

$$F_{P2} = 100 * 6,99/18,81 = 37,2(\%);$$

$$F_{P5} = 100 * 0,02/18,81 = 0,106(\%).$$

5. На клітчатку імовірностей Вейбула (рис. 2.1.1) наносимо точки з координатами: (0,3; 37,2); (0,8; 13,5); ... та (2,00; 0,106). По цих точках проводимо пряму лінію.

6. Перераховуємо частоту 1/50, що цікавить нас, у забезпеченість по формулі (2.1.3):

$$F_{2\%} = 100 * 0,5 / (310 * 50 * 0,1881) = 0,0172(\%).$$

7. На рис. 2.1.1 по $F_{2\%} = 0,0172\%$ знаходимо відповідне значення характерної висоти хвиль $h_{2\%}^{(3)} = 2,55$ м. При цьому пам'ятаємо, що дані спостережень на ГМС мають 3%-ву забезпеченість у системі.

8. По $h_{2\%}^{(3)}$ розраховуємо висоту хвилі забезпеченістю 1% у системі, використовуючи перехідні коефіцієнти k_C (табл. 2.1.1):

$$h_{2\%}^{(1)} = h_{2\%}^{(3)} * k_{1\%} / k_{3\%} = 2,55 * 2,40 / 2,10 = 2,91 \approx 2,9 \text{ (м)}.$$

ВИСНОВОК: значення висоти хвиль 2% у режимі (1 раз на 50 років) і 1% у системі становить 2,9 м (такі хвилі є розрахунковими для захисних споруд портів).

Перелік посилань

1. Полетаєва Л.М., Юрасов С.М., Ільїна В.Г. Конспект лекцій з дисципліни «Моделювання і прогнозування стану довкілля» для студентів спеціальності «Екологія та охорона навколишнього середовища». - Одеса: ОДЕКУ, 2003. – 150 с.
2. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения / Теория. Инженерные методы. Расчеты / Под ред. Лаппо Д.Д. / – Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1990. – 432 с.

2.2 Розрахунок розповсюдження стічних вод в потоке (плоска постановка задачі)

2.2.1 Вивід розрахункової формули

У турбулентних потоках явище пульсації швидкостей супроводить перемішування водних мас. Домішки, що потрапили у ту, або іншу частину потоку, під впливом турбулентного перемішування розповсюджуються в суміжні струмені. Це приводить до розводження домішок, тобто до зниження їх концентрації. У певних умовах на деякій відстані від місця скиду стічних вод концентрація домішок може стати як завгодно малою. Таким чином може відбутися гідродинамічне “очищення потоку”.

Розрахунок розводження стічних вод є основним при оцінці гранично допустимих скидів домішок у потоки. Ці розрахунки виконуються різними методами, які можна поділити на дві основні групи: спрощені і детальні.

Розглянемо детальний метод розрахунку розводження стічних вод у плоскій постановці задачі.

Детальними називають чисельні методи розв’язування рівнянь турбулентної дифузії, що дозволяє одержати поле концентрації домішки в межах розрахункової області потоку, починаючи від джерела забруднення до певного контрольного створу.

У загальному вигляді рівняння турбулентної дифузії консервативної речовини у потоці (при $D = \text{const}$) можна записати таким чином:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) - u \frac{\partial C}{\partial y}, \quad (2.2.1)$$

де C – концентрація речовини;

V_x, V_y, V_z – проекції вектора середньої швидкості течії;

D – коефіцієнт турбулентної дифузії;

u – гідравлічна крупність завислих частинок.

Розглянемо деякий потік з витратою води Q_E , у який з правого берега скидаються стічні води з витратою Q_{CT} та концентрацією домішки C_{CT} , фонові концентрація домішки C_E . З лівого берега боковий приплив речовини відсутній, з правого – дорівнює q_b .

В залежності від характеру потоку і особливостей задачі, яка вирішується, рівняння може бути записане з тими або іншими спрощеннями. Розглянемо випадок, коли зміною концентрації домішки по глибині можна знехтувати ($\partial C / \partial y = 0$). У подальшому будемо вважати, що ось Ox спрямована уздовж середнього вектора швидкості течії ($V_y = V_z =$

0, $V_x = V_c$), гідравлічна крупність частинок дорівнює нулю ($u = 0$), процес розведення стаціонарний ($\partial C / \partial t = 0$), адвективний перенос домішки у напрямі осі Ox набагато більший ніж її турбулентна дифузія у напрямі цієї ж осі ($V_c C \gg -D \partial C / \partial x$).

З урахуванням зроблених припущень, граничних та початкових умов модель розповсюдження речовини у потоці буде представлена у такому вигляді:

$$V_c \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2};$$

$$q_{\text{п}} = q_{\text{б}}, \quad q_{\text{л}} = 0; \tag{2.2.2}$$

$$C(0, z) = C_{\text{ст}}, \quad \text{при } 0 \leq z < b;$$

$$C(0, z) = C_{\text{е}}, \quad \text{при } b \leq z \leq B_c,$$

де $q_{\text{п}}$ і $q_{\text{л}}$ – боковий приплив речовини з правого і лівого берегів;

$C(0, z)$ – концентрація речовини у початковому створі;

b – ширина, на якій стічні води у початковому створі витісняють воду потоку.

Уздовж потоку від джерела забруднення зробимо створи [2] із кроком Δx , по ширині розіб'ємо потік на струмені із кроком Δz (рис. 2.2.1)

Створи і струмені пронумеруємо, при цьому нумерацію створів позначимо індексом “ k ”, а струменів – індексом “ m ”.

	$\uparrow \Delta z$ \downarrow		$\leftarrow \Delta x \rightarrow$	X
m - 1		• $C_{k,m-1}$		$V_c \rightarrow$
m		• $C_{k,m}$	• $C_{k+1,m}$	
m + 1		• $C_{k,m+1}$		
Z		k	k + 1	

Рис. 2.2.1 Нанесення сітки на розрахункову область потоку і нумерація значень концентрації забруднювальної речовини

Середнім значенням концентрації домішки у створі в межах кожного струменя припишемо відповідні індекси, будемо вважати, що ці значення концентрації відносяться до центра струменів.

Запишемо рівняння (2.2.2) у формі кінцевих різниць:

$$V_C \frac{\Delta C}{\Delta x} = D \frac{\Delta^2 C}{\Delta z^2}. \quad (2.2.3)$$

Визначимо перші похідні в рівнянні (2.2.3), використовуючи визначені позначення (рис. 2.2.1):

$$\frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_{k+1,m} - C_{k,m}}{\Delta x}, \quad (2.2.4)$$

$$(\Delta C/\Delta z)_2 = (C_{k,m+1} - C_{k,m}) / \Delta z, \quad (\Delta C/\Delta z)_1 = (C_{k,m} - C_{k,m-1}) / \Delta z, \quad (2.2.5)$$

$$\frac{\Delta^2 C}{\Delta z^2} = \frac{(\Delta C/\Delta z)_2 - (\Delta C/\Delta z)_1}{\Delta z} = \frac{(C_{k,m+1} - C_{k,m}) / \Delta z - (C_{k,m} - C_{k,m-1}) / \Delta z}{\Delta z},$$

звідси

$$\frac{\Delta^2 C}{\Delta z^2} = \frac{C_{k,m+1} + C_{k,m-1} - 2C_{k,m}}{\Delta z^2}, \quad (2.2.6)$$

Підставимо (2.2.4) і (2.2.6) у (2.2.3) та перенесемо V_C і Δx у праву частину рівняння, тоді

$$C_{k+1,m} - C_{k,m} = \frac{D \Delta x}{V_C \Delta z^2} [C_{k,m+1} + C_{k,m-1} - 2C_{k,m}]. \quad (2.2.7)$$

Вирішуючи це рівняння відносно $C_{k+1,m}$, одержимо

$$C_{k+1,m} = a(C_{k,m+1} + C_{k,m-1}) + (1 - 2a)C_{k,m}, \quad (2.2.8)$$

де $a = D\Delta x/(V_C \Delta z^2)$.

Формулу (2.2.8) можна спростити, прийнявши $a = 0,25$, тоді

$$C_{k+1,m} = 0,25(C_{k,m+1} + C_{k,m-1}) + 0,5C_{k,m}, \quad (2.2.9)$$

при $\Delta x = V_C \Delta z^2 / (4D)$. (2.2.10)

Розв'яжемо рівняння (2.2.3) для першого струменя за умови відсутності бокового припливу речовини (рис. 2.2.2):

б е р е г				
1(N=B _C /Δz)		• C _{k,1(N)}	• C _{k+1,1(N)}	X
2(N-1)		• C _{k,2(N-1)}		
		k	k + 1	
Z				

Рис. 2.2.2 Нумерація значень концентрацій домішок біля берега

$$\Delta C / \Delta x = (C_{k+1,1} - C_{k,1}) / \Delta x, \quad (2.2.11)$$

$$\frac{\Delta^2 C}{\Delta z^2} = \frac{(\Delta C / \Delta z)_2 - (\Delta C / \Delta z)_B}{\Delta z} = \frac{(C_{k,2} - C_{k,1}) / \Delta z - 0}{\Delta z},$$

звідси

$$\frac{\Delta^2 C}{\Delta z^2} = \frac{C_{k,2} - C_{k,1}}{\Delta z^2}, \quad (2.2.12)$$

$$C_{k+1,1} - C_{k,1} = \frac{D \Delta x}{V_C \Delta z^2} [C_{k,2} - C_{k,1}],$$

$$C_{k+1,1} = a C_{k,2} + (1 - a) C_{k,1},$$

$$C_{k+1,1} = 0,25 C_{k,2} + 0,75 C_{k,1}. \quad (2.2.13)$$

При наявності бокового припливу речовини рішення для струменя N буде мати наступний вигляд:

$$q_B = H_C q_T = - H_C D \partial C / \partial z \rightarrow \partial C / \partial z = (\Delta C / \Delta z)_B = - q_B / (H_C D), \quad (2.2.14)$$

$$\frac{\Delta^2 C}{\Delta z^2} = \frac{(\Delta C / \Delta z)_2 - (\Delta C / \Delta z)_B}{\Delta z} = \frac{(C_{k,N-1} - C_{k,N}) / \Delta z + q_B / (H_C D)}{\Delta z},$$

звідси

$$\frac{\Delta^2 C}{\Delta z^2} = \frac{C_{k,N-1} - C_{k,N} + \Delta z q_B / (H_C D)}{\Delta z^2}. \quad (2.2.15)$$

Тоді

$$C_{k+1,N} - C_{k,N} = \frac{D \Delta x}{V_C \Delta z^2} \left[C_{k,N-1} - C_{k,N} + \frac{\Delta z q_B}{H_C D} \right],$$

$$C_{k+1,1} = a [C_{k,N-1} + \Delta z q_B / (H_C D)] + (1 - a) C_{k,N},$$

$$C_{k+1,1} = 0,25 [C_{k,N-1} + \Delta z q_B / (H_C D)] + 0,75 C_{k,N}. \quad (2.2.16)$$

Таким чином, рішення моделі розповсюдження речовини у потоці може бути записано у наступному вигляді:

$$C_{k+1,m} = 0,25(C_{k,m+1} + C_{k,m-1}) + 0,5C_{k,m},$$

$$\text{при } \Delta x = V_C \Delta z^2 / (4D), \quad 2 \leq m \leq (B_C / \Delta z) - 1;$$

$$C_{k+1,1} = 0,25C_{k,2} + 0,75C_{k,1};$$

$$C_{k+1,N} = 0,25 [C_{k,N-1} + \Delta z q_B / (H_C D)] + 0,75C_{k,N};$$

$$C(k,m) = C_{СТ}, \quad \text{при } k = 0 \text{ і } 1 \leq m \leq b / \Delta z;$$

$$C(k,m) = C_E, \quad \text{при } k = 0 \text{ і } b / \Delta z < m \leq B_C / \Delta z.$$

2.2.2 Вихідні дані для розрахунку

Q_E – витрата води у потоці вище місця скиду стічних вод;

C_E – концентрація домішки у воді потоку вище місця скиду (фонова концентрація);

$Q_{СТ}$ – витрата стічних вод;

$C_{СТ}$ – концентрація домішки у стічних водах;

V_C – середня швидкість потоку на розрахунковій ділянці;

B_C – середня ширина потоку у місті скиду;

H_C – середня глибина потоку на розрахунковій ділянці;

D – коефіцієнт турбулентної дифузії, який розраховується по формулі:

$$D = g H_C V_C / (M C), \quad (2.2.17)$$

де C – коефіцієнт Шезі, визначається по таблиці 2.2.1 в залежності від типу водотоку [2];

M – параметр, розраховується по формулі (2.2.18):

$$M = \begin{cases} 0,7C + 6, & \text{при } 10 < C < 60, \\ 48, & \text{при } C > 60. \end{cases} \quad (2.2.18)$$

Необхідно також знати, у якому місці початкового створу скидаються стічні води ($Z_{ст}$).

Таблиця 2.2.1 Типізація водотоків за особливостями гідродинамічного режиму

Тип водотоку	Група	Перемішування	Грунт	C , м/с	Річна витрата, м ³ /с
Рівнинні	великі	добре	гравій	40 - 70	>250
	середні	помірне	пісок, мул	30 - 60	25 – 250
	малі	слабке	пісок, мул	30 - 50	2,5 – 25
	струмки	помірне	пісок, мул	10 - 30	2,5
Гірські	середні	дуже добре	валуни	20 - 35	25
	малі	добре	галька	15 - 30	2,5 – 25
	струмки	добре	валуни	10 - 20	2,5
Передгірні	середні	добре	галька, гравій, пісок	20 - 40	25 – 250

2.2.3 Послідовність розрахунку

1. Визначається умовна площа поперечного перерізу припливу стічних вод, виходячи з припущення, що швидкість стічних вод у потоці дорівнює швидкості самого потоку:

$$\delta = Q_{ст} / V_c. \quad (2.2.19)$$

2. Розраховується ширина припливу стічних вод у початковому створі (ширина, на якій відбувається витиснення чистої води стічною водою з концентрацією домішки $C_{ст}$):

$$b = \delta / H_c. \quad (2.2.20)$$

3. За величиною “ b ” визначається ширина розрахункового осередку Δz з урахуванням такої вимоги:

$$\Delta z = b/n; \quad n = 1, 2, \dots; \quad \Delta z \leq 0,1b_c. \quad (2.2.21)$$

4. Розраховується довжина розрахункового осередку:

$$\Delta x = V_c \Delta z^2 / (4D) . \quad (2.2.22)$$

5. Визначається загальна кількість струменів по ширині потоку

$$N = V_c / \Delta z . \quad (2.2.23)$$

6. Визначається кількість струменів (із загального N), у яких знаходиться стічна вода:

$$n = v / \Delta z . \quad (2.2.24)$$

7. На розрахунковій області потоку розбивається сітка з осередками Δx , Δz . У початковому створі в “ n ” клітинок, що відповідають місцю розташування скиду стічних вод, записується значення концентрації домішки у стічних водах ($C_{ст}$). В решту $N-n$ осередків початкового створу записуються значення фонові концентрації (C_E).

8. Розрахунок концентрації домішки в осередках наступного створу здійснюється за формулою (2.2.9).

При розрахунках у меж потоку використовуються формули (2.2.13) чи (2.2.16).

Розрахувавши таким чином концентрації домішки в осередках другого створу, переходимо до наступного і т.д.

В усіх створах сума концентрацій домішки повинна бути постійною.

9. Якщо розміри клітин дуже малі, [2] то розрахунок виконується до створу, де приклади поширюються на 20-50 осередків. Після цього осередки об'єднуються по $\mu = 2, 3, \dots$ (новий крок Δz_2 по осі OZ дорівнює $\mu \Delta z_1$), визначається новий крок $\Delta x_2 = \mu^2 \Delta x_1$ і розрахунок продовжується. При необхідності можна повторити збільшення кроку.

Контрольні запитання

1. Які методи розрахунку розводження стічних вод називаються детальними?
2. Запишіть рівняння турбулентної дифузії для плоскої задачі при відсутності поперечних течій, зневажаючи гідравлічною крупністю часток і враховуючи процес розводження стаціонарним?
3. Як задається сітка на розрахунковій області потоку?
4. Запишіть розрахункову формулу, при яких умовах вона виконується?
5. Які дані необхідні для розрахунку розводження стічних вод?
6. Виходячи з яких умов визначається розмір осередків?
7. Як виконується розрахунок біля берегів?
8. Як збільшуються розміри розрахункової сітки?

Завдання для самостійної роботи

Розрахувати поле концентрацій домішки у потоці на відстані 10 Δх від місця скиду стічних вод. Виразити цю відстань у метрах. Визначити максимальну концентрацію домішки у створі на відстані 10 Δх. Оформлену роботу подати до захисту. Робота повинна містити: розрахункові формули, вихідні дані, результати розрахунку у вигляді схеми. Вихідні дані для роботи наведені у табл. 2.2.2.

Таблиця 2.2.2 - Вихідні дані по варіантах

Показник	Значення показників по варіантах									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Q_E	1,76	2,77	1,48	1,36	1,65	1,40	2,05	1,21	0,96	1,39
S_E	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$Q_{СТ}$	0,18	0,23	0,20	0,16	0,15	0,16	0,20	0,14	0,16	0,16
$S_{СТ}$	100	110	120	130	140	150	90	80	145	135
V_C	0,12	0,20	0,14	0,13	0,15	0,15	0,18	0,15	0,14	0,19
B_C	27	30	20	26	24	26	25	20	20	24
H_C	0,60	0,50	0,60	0,45	0,50	0,40	0,50	0,45	0,40	0,34
$Z_{СТ}$	5	0	0	13	12	0	0	10	5	6

Приклад розрахунку

ВИХІДНІ ДАНІ. У потік з витратою $Q_E = 8,4 \text{ м}^3/\text{с}$ і фоновою концентрацією домішки $C_E = 2 \text{ мг}/\text{дм}^3$ скидаються стічні води з витратою $Q_{СТ} = 0,6 \text{ м}^3/\text{с}$ та концентрацією домішки $C_{СТ} = 120 \text{ мг}/\text{дм}^3$.

Середня швидкість води на розрахунковій ділянці складає $V_C = 0,22 \text{ м}/\text{с}$, середня ширина і глибина ділянки дорівнюють $B_C = 37,0 \text{ м}$ і $H_C = 1,10 \text{ м}$. Коефіцієнт Шезі дорівнює 29,2. Стічні води скидаються на відстані 2,5 м від правого берега.

РІШЕННЯ.

1) $\delta = 0,60 / 0,22 = 2,73 \text{ (м}^2\text{)}$.

2) $b = 2,73 / 1,10 = 2,48 \text{ (м)}$.

3) $\Delta z = 1,24 \text{ (м)}$.

Величина $\Delta z = 1,24 \text{ м}$ відповідає умові (2.2.21), вона не перевищує десяти відсотків ширини водотоку.

4) Для розрахунку Δx попередньо визначаємо значення коефіцієнта D:

$$D = (9,8 \cdot 1,10 \cdot 0,22) / (29,2 \cdot (0,7 \cdot 29,2 + 6)) = 0,0031 \text{ (м}^2/\text{с)},$$

...	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	
7	0	0	0	1,5625	
6	0	0	6,25	10,9375	
5	0	25	31,25	32,8125	
4	100	75	62,50	54,6875	
3	100	75	62,50	54,6875	
2	0	25	31,25	32,8125	
m=1	0	0	6,25	12,5000	
	$\Sigma 200$	200	200	200	

б е р е г

Рис. 2.2.5 Приклад розрахунку (значення концентрацій у відсотках від приведеної концентрації забруднювальної речовини у стічній воді)

ВИСНОВОК. На рис.2.2.4 видно, що на відстані 82 м від місця скиду стічних вод максимальна концентрація забруднювальної речовини складає 66,5 мг/дм³; на рис. 2.2.5 максимальна концентрація на тій же відстані складає $(120-2) * 54,6875/100 + 2 = 66,53125 \approx 66,5$ мг/дм³.

Перелік посилань

1. Караушев А. В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеиздат, 1969.– 461 с.
2. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. – Л.: Гидрометеиздат, 1987.
3. Полетаєва Л.М., Юрасов С.М., Ільїна В.Г. Конспект лекцій з дисципліни «Моделювання і прогнозування стану довкілля» для студентів спеціальності «Екологія та охорона навколишнього середовища». - Одеса: ОДЕКУ, 2003. – 150 с.

3 Розрахунок розповсюдження стічних вод в потоке (просторова задача)

3.1 Вивід розрахункової формули

Детальний метод розрахунку розводження стічних вод у потоках в просторовій постановці застосовується у тих випадках, коли скидання стічних вод не охоплює усієї глибини потоку і перемішування вод по вертикалі у ньому відбувається недостатньо інтенсивно. Розрахунок є основним при оцінці якості води на різних відстанях від випуску стічних

вод. Він дозволяє простежити розповсюдження речовини у потоці не тільки по його ширині та довжині, але й по глибині.

Метод, що розглядається, як і усі детальні методи, заснован на чисельному розв'язанні диференціального рівняння турбулентної дифузії, яке можна записати таким чином:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) - u \frac{\partial C}{\partial y}. \quad (2.3.1)$$

де C – концентрація речовини;

V_x, V_y, V_z – проєкції вектора середньої швидкості течії;

D – коефіцієнт турбулентної дифузії;

u – гідравлічна крупність завислих частинок.

Розглянемо випадок, коли процес розводження стаціонарний ($\partial C / \partial t = 0$), гідравлічна крупність частинок речовини дорівнює нулю ($u = 0$), осереднений вектор швидкості потоку горизонтальний і ось Ox співпадає з його напрямком ($V_x = V_c, V_y = V_z = 0$), адвективний перенос речовини у напрямку осі Ox набагато більше її турбулентної дифузії ($V_c C \gg -D \partial C / \partial x \rightarrow -D \partial C / \partial x = 0 \rightarrow D \partial^2 C / \partial x^2 = 0$).

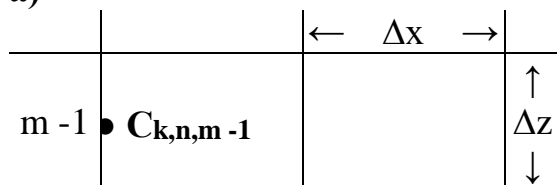
З урахуванням зроблених припущень рівняння (2.3.1) буде мати наступний вигляд:

$$V_c \frac{\partial C}{\partial x} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right). \quad (2.3.2)$$

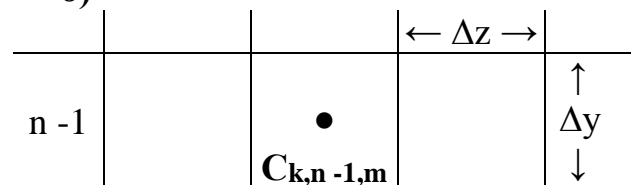
Розглянемо деякий потік, у який скидаються стічні води. У розрахунковій області потоку (від джерела забруднення до створу, який нас цікавить) проведемо ось Ox так, щоб її напрямком співпадав з вектором осередненої швидкості по току, ось Oy направимо вниз перпендикулярно поверхні потоку, тоді ось Oz пройде поперек потоку.

Розіб'ємо у розрахунковій області потоку вздовж осі Ox створи з кроком Δx , а також вздовж осі Oy горизонти з кроком Δy і струї вздовж осі Oz з кроком Δz , при цьому будемо вважати, що $\Delta y = \Delta z$. Нумерування створів визначимо індексом k , горизонтів – індексом n , струй – індексом m (рис. 2.3.1).

а)



б)



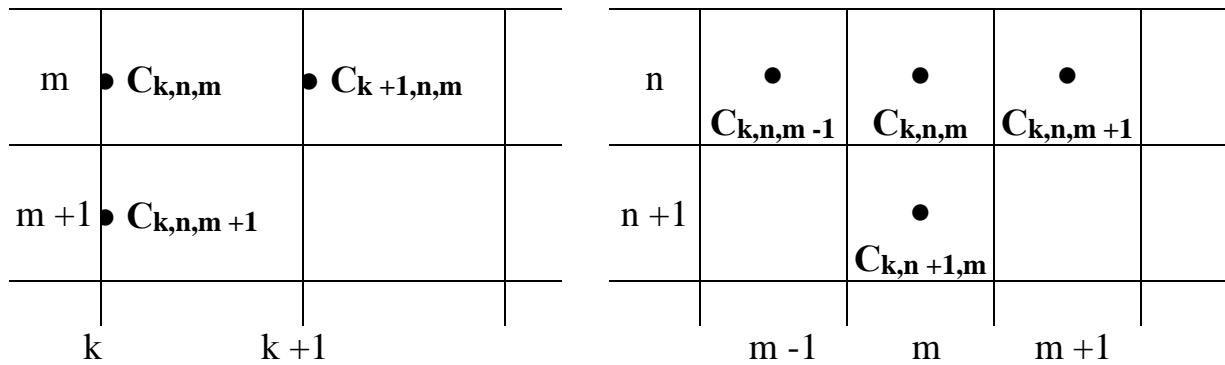


Рис. 2.3.1 Нумерування концентрацій речовини в осередках розрахункової сітки (а – вид зверху на горизонті n ; б – вид зліва у створі k)

Середнім значенням концентрації речовини у кожному осередку сітки, яка отримана, припишемо відповідні індекси і будемо вважати, що ці значення концентрації відносяться до центрів ваги осередків (рис. 2.3.1).

Запишемо рівняння (2.3.2) у формі кінцевих різностей:

$$V_C \Delta C / \Delta x = D (\Delta^2 C / \Delta y^2 + \Delta^2 C / \Delta z^2). \quad (2.3.3)$$

Визначимо перші похідні в рівнянні (2.3.3), використовуючі прийняті позначення концентрацій речовини (рис. 2.3.1):

$$\Delta C / \Delta x = (C_{k+1,n,m} - C_{k,n,m}) / \Delta x, \quad (2.3.4)$$

$$\Delta C / \Delta y \Big|_1 = (C_{k,n,m} - C_{k,n-1,m}) / \Delta y, \quad \Delta C / \Delta y \Big|_2 = (C_{k,n+1,m} - C_{k,n,m}) / \Delta y,$$

$$\Delta C / \Delta z \Big|_1 = (C_{k,n,m} - C_{k,n,m-1}) / \Delta z, \quad \Delta C / \Delta z \Big|_2 = (C_{k,n,m+1} - C_{k,n,m}) / \Delta z.$$

Знайдемо другі похідні C по y і по z :

$$\begin{aligned} \Delta^2 C / \Delta y^2 &= (\Delta C / \Delta y \Big|_2 - \Delta C / \Delta y \Big|_1) / \Delta y = \\ &= (C_{k,n+1,m} + C_{k,n-1,m} - 2C_{k,n,m}) / \Delta y^2, \end{aligned} \quad (2.3.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta^2 C / \Delta z^2 &= (\Delta C / \Delta z \Big|_2 - \Delta C / \Delta z \Big|_1) / \Delta z = \\ &= (C_{k,n,m+1} + C_{k,n,m-1} - 2C_{k,n,m}) / \Delta z^2. \end{aligned} \quad (2.3.6)$$

Підставимо формули (2.3.4), (2.3.5) і (2.3.6) у формулу (2.3.3), перенесемо V_C і Δx в праву частину рівняння, тоді (враховуючі, що $\Delta y = \Delta z$) одержимо

$$C_{k+1,n,m} - C_{k,n,m} = a (C_{k,n+1,m} + C_{k,n-1,m} + C_{k,n,m+1} + C_{k,n,m-1} - 4C_{k,n,m}), \quad (2.3.7)$$

$$\text{де } a = D\Delta x / (V_C\Delta z^2). \quad (2.3.8)$$

Вирішуючи це рівняння відносно $C_{k+1,n,m}$ і прийнявши $a = 0,125$, у кінцевому вигляді одержимо:

$$C_{k+1,n,m} = 0,125 (C_{k,n+1,m} + C_{k,n-1,m} + C_{k,n,m+1} + C_{k,n,m-1}) + 0,5 C_{k,n,m}, \quad (2.3.9)$$

при $\Delta y = \Delta z$ і $\Delta x = V_C\Delta z^2 / (8D)$.

Останнє рівняння (розрахунок Δx) одержано зі (2.3.8) при $a = 0,125 = 1/8$.

Знайдемо рішення рівняння (2.3.3) у поверхні потоку по схемі рис. 2.3.2.

Запишемо перші похідні в рівняння (2.3.3), використовуючі прийняті позначення концентрацій речовини (рис. 2.3.2):

$$\Delta C / \Delta x = (C_{k+1,1,m} - C_{k,1,m}) / \Delta x, \quad (2.3.10)$$

$$\Delta C / \Delta y \Big|_1 = 0, \quad \Delta C / \Delta y \Big|_2 = (C_{k,2,m} - C_{k,1,m}) / \Delta y,$$

$$\Delta C / \Delta z \Big|_1 = (C_{k,1,m} - C_{k,1,m-1}) / \Delta z, \quad \Delta C / \Delta z \Big|_2 = (C_{k,1,m+1} - C_{k,1,m}) / \Delta z.$$

Знайдемо другі похідні C по y і по z :

$$\begin{aligned} \Delta^2 C / \Delta y^2 &= (\Delta C / \Delta y \Big|_2 - \Delta C / \Delta y \Big|_1) / \Delta y = \\ &= (C_{k,2,m} - C_{k,1,m}) / \Delta y^2, \end{aligned} \quad (2.3.11)$$

$$\begin{aligned} \Delta^2 C / \Delta z^2 &= (\Delta C / \Delta z \Big|_2 - \Delta C / \Delta z \Big|_1) / \Delta z = \\ &= (C_{k,1,m+1} + C_{k,1,m-1} - 2C_{k,1,m}) / \Delta z^2. \end{aligned} \quad (2.3.12)$$

а)

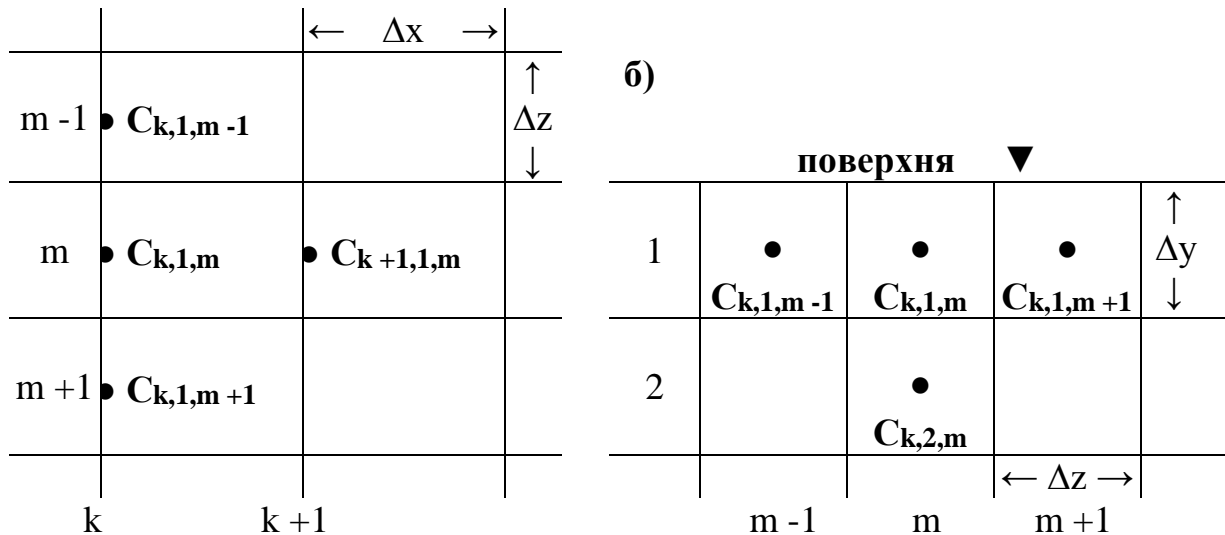


Рис. 2.3.2 Нумерування концентрацій речовини в осередках розрахункової сітки (а – вид зверху на першому горизонті; б – вид зліва у створі k)

Підставимо формули (2.3.10), (2.3.11) і (2.3.12) у формулу (2.3.3), перенесемо V_C і Δx в праву частину рівняння, тоді (враховуючі, що $\Delta y = \Delta z$) одержимо:

$$C_{k+1,1,m} - C_{k,1,m} = a (C_{k,2,m} + C_{k,1,m+1} + C_{k,1,m-1} - 3C_{k,1,m}), \quad (2.3.13)$$

Звідси

$$C_{k+1,1,m} = 0,125 (C_{k,2,m} + C_{k,1,m+1} + C_{k,1,m-1}) + 0,625 C_{k,1,m}. \quad (2.3.14)$$

Умови використання формули (2.3.14) такі, як і формули (2.3.9).

Аналогічно можна записати формули розрахунку концентрації речовини біля дна формула (2.3.15) і берегів формули (2.3.16) і (2.3.17) при умові, що боковий приплив речовини відсутній:

$$C_{k+1,N,m} = 0,125 (C_{k,N-1,m} + C_{k,N,m+1} + C_{k,N,m-1}) + 0,625 C_{k,N,m}, \quad (2.3.15)$$

$$C_{k+1,n,1} = 0,125 (C_{k,n+1,1} + C_{k,n-1,1} + C_{k,n,2}) + 0,625 C_{k,n,m}, \quad (2.3.16)$$

$$C_{k+1,n,M} = 0,125 (C_{k,n+1,M} + C_{k,n-1,M} + C_{k,n,M-1}) + 0,625 C_{k,n,m}, \quad (2.3.17)$$

де N і M – загальна кількість горизонтів і струй відповідно.

2.3.2 Вихідні дані для розрахунку

Для виконання розрахунку необхідні наступні вихідні дані:

Q_E – витрата води у потоці вище місця скиду стічних вод;

C_E – концентрація домішки у воді потоку вище місця скиду (фонова концентрація);

Q_{CT} – витрата стічних вод;

C_{CT} – концентрація домішки у стічних водах;

V_C – середня швидкість потоку на розрахунковій ділянці;

B_C – середня ширина потоку у місті скиду;

H_C – середня глибина потоку на розрахунковій ділянці;

D – коефіцієнт турбулентної дифузії, який розраховується по формулі:

$$D = gH_C V_C / (MC), \quad (2.3.18)$$

де C – коефіцієнт Шезі, визначається по таблиці 2.2.1 (стор.) в залежності від типу водотоку [2];

M – параметр, розраховується по формулі (2.3.19):

$$M = \begin{cases} 0,7C + 6, & \text{при } 10 < C < 60, \\ 48, & \text{при } C \geq 60. \end{cases} \quad (2.3.19)$$

Необхідно також знати, у якому місці початкового створу скидаються стічні води (Z_{CT}).

2.3.3 Послідовність розрахунку

1. Визначається умовна площа поперечного перетину притоку стічних вод, виходячі з припущення, що швидкість стічних вод у потоці дорівнює швидкості самого потоку:

$$\delta = Q_{CT} / V_C. \quad (2.3.20)$$

2. Розраховується середня ширина b (або вертикальний розмір h) поперечного перетину притоку стічних вод:

$$b = \delta / h. \quad (2.3.21)$$

Якщо $h = b$, то їх значення можна розрахувати за формулою:

$$b = h = \sqrt{\delta}. \quad (2.3.22)$$

3. Добирається $\Delta y = \Delta z$ таким чином, щоб h , b і H_C розділялися приблизно цілком (з погрешністю $\pm 5-10\%$).

4. Розраховується Δx по формулі:

$$\Delta x = V_C \Delta z^2 / (8D). \quad (2.3.23)$$

5. Визначається загальна кількість струй M і горизонтів N :

$$M = V_C / \Delta z \quad \text{і} \quad N = H_C / \Delta y. \quad (2.3.24)$$

6. Визначається кількість осередків (із загальної кількості), які займає стічна вода по ширині і глибині у початковому перетині:

$$m_B = b / \Delta z \quad \text{і} \quad n_H = h / \Delta y. \quad (2.3.25)$$

7. На плоскості початкового перетину потоку розбивається сітка з осередками Δy і Δz . В m_B і n_H кліточок, які відповідають місту розташування скида стічних вод, записується значення концентрації речовини у стічних водах (C_{CT}). В решту осередків початкового перетину записуються значення фонові концентрації речовини (C_E).

8. Розрахунок концентрації речовини у осередках другого перетину відбувається за допомогою формул (2.3.9), (2.3.14) – (2.3.17).

Розрахувавши таким чином значення концентрації речовини у другому перетині, переходять до наступного і т.д.

В усіх перетинах сума значень концентрації речовини повинна бути постійною.

9. Результати розрахунку можуть бути подані набором таблиць, кожна із яких відповідає визначеному перетину, або у вигляді графіків з ізолініями рівних значень концентрації речовини на різних горизонтах (наприклад: поверхня, 0,5H, дно).

10. Розрахунок можна вести у перевищеннях над фоном (у приведених концентраціях):

$$C_P = C - C_E. \quad (2.2.25)$$

Тоді перехід до абсолютних значень концентрації речовини після розрахунку в будь-якій точці розглядуваної області виконується за формулою:

$$C = C_P + C_E.$$

Контрольні запитання

9. Які методи розрахунку розводження стічних вод називаються детальними?

10. Запишіть рівняння турбулентної дифузії для просторової задачі при відсутності поперечних течій, зневажаючи гідравлічною крупністю часток і враховуючи процес розводження стаціонарним?
11. Як задається сітка на розрахунковій області потоку?
12. Запишіть розрахункову формулу, при яких умовах вона виконується?
13. Які дані необхідні для розрахунку розводження стічних вод?
14. Виходячи з яких умов визначається розмір осередків?
15. Як виконується розрахунок біля берегів?
16. Як збільшуються розміри розрахункової сітки?

Завдання для самостійної роботи

Розрахувати поле концентрацій домішки у потоці на відстані $5\Delta x$. Визначити максимальну концентрацію домішки у створі на відстані $5\Delta x$ і ширину зони забруднення. Оформлену роботу подати до захисту. Робота повинна містити: розрахункові формули, вихідні дані, результати розрахунку у вигляді схем. Вихідні дані наведені у табл. 2.3.2. Стічні води скидаються у середині потоку.

Таблиця 2.3.2 - Вихідні дані по варіантах

Показник	Значення показників по варіантах									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Q_E	13,8	15,9	14,3	12,3	17,8	14,1	12,6	16,6	13,0	16,0
C_E	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Q_{CT}	0,18	0,23	0,20	0,16	0,15	0,16	0,20	0,14	0,16	0,16
C_{CT}	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
V_C	0,22	0,20	0,24	0,23	0,25	0,20	0,18	0,25	0,24	0,21
B_C	32	30	30	26	34	32	35	30	30	34
H_C	1,96	2,65	1,98	2,05	2,10	2,20	2,00	1,90	1,80	2,25

Приклад розрахунку

ВИХІДНІ ДАНІ. У потік з витратою $Q_E = 14,8 \text{ м}^3/\text{с}$ і фоновією концентрацією домішки $C_E = 3 \text{ мг}/\text{дм}^3$ скидаються стічні води з витратою $Q_{CT} = 0,30 \text{ м}^3/\text{с}$ та концентрацією домішки $C_{CT} = 125 \text{ мг}/\text{дм}^3$.

Середня швидкість потоку на розрахунковій ділянці складає $V_C = 0,22 \text{ м}/\text{с}$, середня ширина і глибина ділянки дорівнюють $B_C = 32,0 \text{ м}$ і $H_C =$

2,10 м. Коефіцієнт Шезі дорівнює 30. Стічні води скидаються у середині потоку.

РІШЕННЯ.

4) $\delta = 0,30 / 0,22 = 1,36 \text{ (м}^2\text{)}.$

5) $b = h = (1,36)^{1/2} = 1,17 \text{ (м)}.$

6) $\Delta y = \Delta z = 0,55 \text{ (м)}.$

7) $D = 9,8 * 2,10 * 0,22 / 30 / (0,7 * 30 + 6) = 0,0056 \text{ (м}^2\text{/с)}.$

8) $\Delta x = 0,22 * 0,55^2 / (8 * 0,0055) = 1,51 \text{ (м)}.$

9) $M = 2,10 / 0,55 = 3,81 \approx 4, \quad N = 32,0 / 0,55 = 58,2 \approx 58.$

10) $m_B = n_H = 1,17 / 0,55 = 2,13 \approx 2.$

11) Розрахунок поля концентрацій виконуємо у перевищеннях над фоном рис. 2.3.3: $C_{CT}^{(PP)} = 125 - 3 = 122 \text{ (мг/дм}^3\text{)}; C_E^{(PP)} = 3 - 3 = 0.$

12) Контрольна сума дорівнює: $2 * 2 * 122 = 488.$

ВИСНОВОК. На відстані $5\Delta x = 7,6 \text{ (м)}$ від місця скиду стічних вод максимальна концентрація речовини складає $66,2 + 3,0 = 69,2 \text{ (мг/дм}^3\text{)}$ при ширині зони забруднення $12\Delta z = 12 * 0,55 = 6,6 \text{ (м)}$.

Перелік посилань

4. Караушев А. В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеиздат, 1969.– 461 с.

5. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. – Л.: Гидрометеиздат, 1987.

2.4 Розрахунок розповсюдження речовини у водному середовищі при аварійних розливах (циліндричні координати)

2.4.1 Розв'язання диференціального рівняння

Модель розповсюдження речовини при аварійних розливах в циліндричних координатах разом з граничними й початковими умовами можна записати у вигляді:

$$\partial C / \partial t = D(\partial^2 C / \partial r^2) + D/r (\partial C / \partial r) + Ck_H, \quad (2.4.1)$$

$$\partial C / \partial t \Big|_{r \rightarrow 0} = 2D(\partial^2 C / \partial r^2) + Ck_H,$$

$$C(t,r) = C_0, \quad \text{при } t = 0 \text{ і } 0 < r \leq r_0;$$

$$C(t,r) = C_E, \quad \text{при } t = 0 \text{ і } r > r_0,$$

поверхня **k = 0**

0	0	0	0
0	0	0	0
0	122,000	122,000	0
0	122,000	122,000	0

дно **Σ = 488**

поверхня **k = 1**

0	0	0	0	0	0
0	0,000	15,250	15,250	0,000	0
0	15,250	91,500	91,500	15,250	0
0	15,250	106,750	106,750	15,250	0

дно **Σ = 488**

поверхня **k = 2**

0	0,000	0,000	1,906	1,906	0,000	0,000	0
0	0,000	3,813	20,969	20,969	3,813	0,000	0
0	1,906	20,969	74,344	74,344	20,969	1,906	0
0	1,906	24,781	93,406	93,406	24,781	1,906	0

дно **Σ = 488**

поверхня **k = 3**

0	0,000	0,000	0,715	4,051	4,051	0,715	0,000	0,000	0
0	0,000	0,715	7,148	23,113	23,113	7,148	0,715	0,000	0
0	0,238	3,813	23,590	63,383	63,383	23,590	3,813	0,238	0
0	0,238	4,527	30,023	82,445	82,445	30,023	4,527	0,238	0

дно **Σ = 488**

поверхня **k = 4**

0	0,0000	0,0000	0,1787	1,8467	6,0166	6,0166	1,8467	0,1787	0,0000	0,0000	0
0	0,0000	0,1191	1,7275	9,5908	23,7686	23,7686	9,5908	1,7275	0,1191	0,0000	0
0	0,0298	0,6255	5,5400	24,8408	55,7578	55,7578	24,8408	5,5400	0,6255	0,0298	0
0	0,0298	0,7446	7,0889	32,5850	73,5098	73,5098	32,5850	7,0889	0,7446	0,0298	0

дно **Σ = 488**

поверхня **k = 5**

0	0,0000	0,0000	0,0372	0,5585	3,1274	7,7144	7,7144	3,1274	0,5585	0,0372	0,0000	0,0000	0
0	0,0000	0,0186	0,3537	2,7924	11,3184	23,7760	23,7760	11,3184	2,7924	0,3537	0,0186	0,0000	0
0	0,0037	0,0968	1,1169	7,0554	25,3546	50,1135	50,1135	25,3546	7,0554	1,1169	0,0968	0,0037	0
0	0,0037	0,1154	1,4334	9,2892	33,5455	66,1752	66,1752	33,5455	9,2892	1,4334	0,1154	0,0037	0

дно **Σ = 488**

Рисунок 2.3.3 - Розрахунок дифузії забруднювальної речовини у потоці

де C_0 - концентрація речовини в початковий момент часу у плямі;

r_0 - радіус плями в початковий момент часу.

Крім того, повинна виконуватись ще одна умова:

$$2\pi \int_0^{r_t} C(t,r)rdr = m_0 \exp(k_n t), \quad (2.4.2)$$

де r_t - радіус плями в момент часу t ;

$C(t,r)$ – концентрація речовини в момент часу t в плямі на відстані r від центра;

m_0 - маса речовини в плямі в початковий момент часу.

У рівнянні (2.4.2) правий і лівий вирази позначають масу речовини у плямі в момент часу t .

Скористуємось диференціальним рівнянням з граничними й початковими умовами (2.4.1) для виводу розрахункової формули, яка дозволить визначити значення концентрації речовини в плямі в різні моменти часу.

В деякий момент [11] часу $t=k\Delta t$ (де Δt - крок в часі) виділимо на плямі забруднення сектор з кутом α , розіб'ємо його дугами з кроком Δr на відсіки (рис. 2.4.1), пронумеруємо ці відсіки, починаючи від центра $n=1,2,3\dots$. Передбачимо, що середні концентрації речовини у відсіках спостерігаються на дугах, які проходять через середину відсіку. Середню концентрацію речовини в момент часу $t=k\Delta t$ в відсіку з номером n позначимо $C_{k,n}$. Вона буде спостерігатись на відстані $r_n=(2n-1)(\Delta r/2)$ від центра. Середні концентрації речовини у відсіках ліворуч і праворуч від відсіку, який розглядається, у той же момент часу позначимо $C_{k,n-1}$, і $C_{k,n}$, а концентрацію у відсіку n у подальший момент часу $t_{k+1}=(k+1)\Delta t$ позначимо $C_{k+1,n}$.

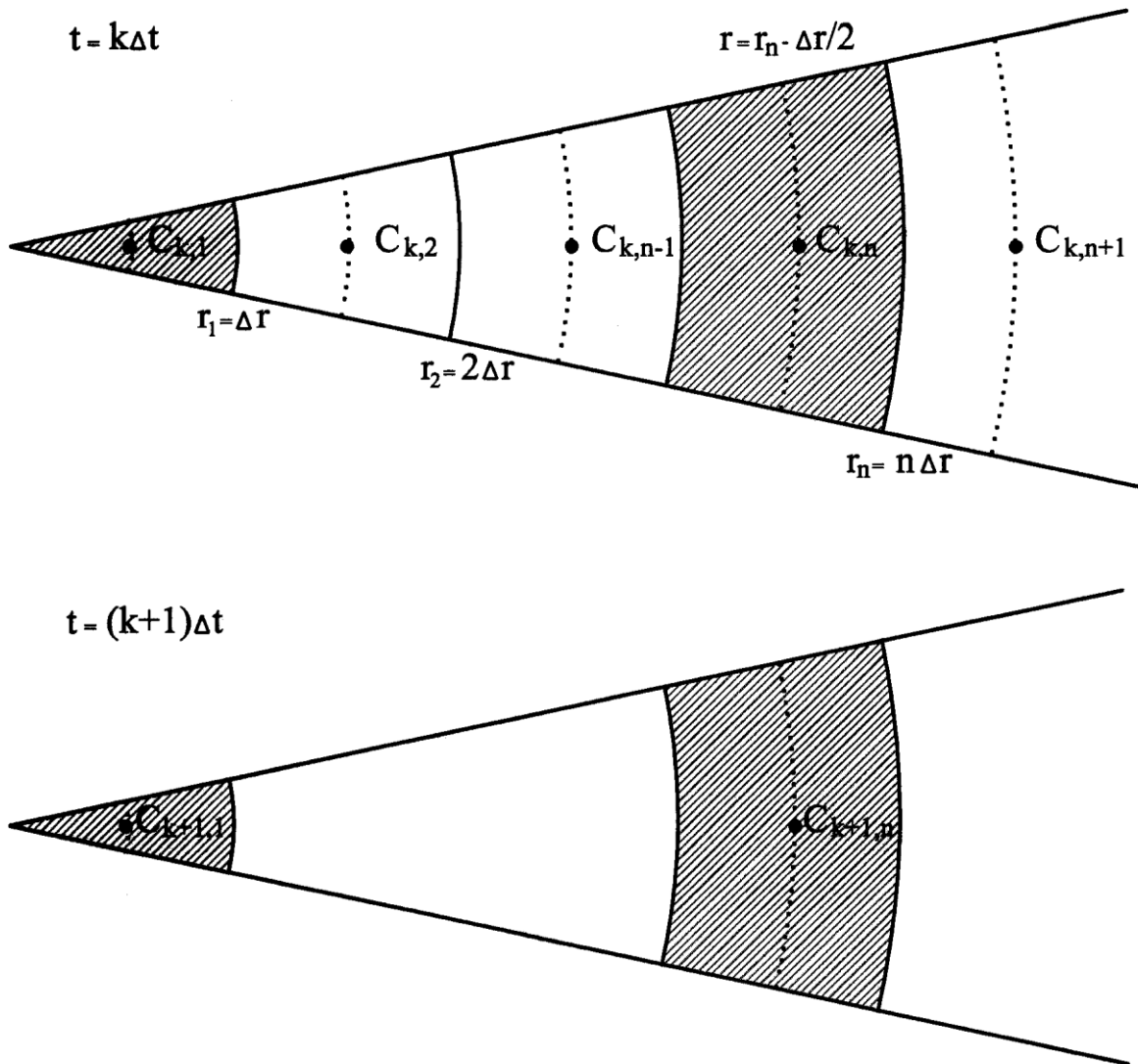


Рисунок 2.4.1 - Схема до виводу розрахункової формули

Основне рівняння (2.4.1) у формі кінцевих різниць буде мати наступний вигляд:

$$\Delta C / \Delta t = D(\Delta^2 C / \Delta r^2) + (D/r)(\Delta C / \Delta r) + k_n C. \quad (2.4.3)$$

Запишемо всі прирощення в формулі (2.4.3), використовуючи прийняті позначення (рис. 2.4.1):

$$\begin{aligned} \Delta C / \Delta t &= (C_{k+1,n} - C_{k,n}) / \Delta t, \\ \Delta C / \Delta r &= (C_{k,n+1} - C_{k,n-1}) / (2\Delta r), \\ \Delta^2 C / \Delta r^2 &= [(\Delta C / \Delta r)_n - (\Delta C / \Delta r)_l] / \Delta r = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= [(C_{k,n+1} - C_{k,n})/\Delta r - (C_{k,n} - C_{k,n-1})/\Delta r]/\Delta r = \\
&= (C_{k,n+1} + C_{k,n-1} - 2C_{k,n})/\Delta r^2, \\
r &= (n\Delta r - \Delta r/2) = \Delta r(n - 1/2) = \Delta r(2n - 1)/2,
\end{aligned}$$

де $(\Delta C/\Delta r)_П$ і $(\Delta C/\Delta r)_Л$ - прирощення концентрації на правій і лівій межах відсіку з номером n .

Підставивши ці вирази в формулу (2.4.3), розкривши дужки і вирішивши її відносно $C_{k+1,n}$, отримаємо:

$$C_{k+1,n} = (1 - 2a + k_H \Delta t)C_{k,n} + a(bC_{k,n+1} + dC_{k,n-1}), \quad (2.4.4)$$

де $a=D\Delta t/\Delta r^2$; $b=2n/(2n-1)$; $d=2(n-1)/(2n-1)$.

Покажемо, що формула (2.4.4) справедлива і для першого відсіку (при $n=1$).

Для цього введемо такі позначення $C_{k,1}$ і $C_{k,2}$ - середні концентрації речовини в першому і в другому відсіках в момент часу t_k ; $C_{k+1,1}$ - середня концентрація речовини в першому відсіку в момент часу t_{k+1} ; $(\Delta C/\Delta r)_П$ і $(\Delta C/\Delta r)_Л$ - похідні на правій і лівій межах відсіку (нагадаємо, що в центрі $\Delta C/\Delta r=0$).

Подамо формулу (2.4.1) у формі кінцевих різностей:

$$(\Delta C/\Delta t) \Big|_{r \rightarrow 0} = 2D(\Delta^2 C/\Delta r^2) + k_H C. \quad (2.4.5)$$

Запишемо всі елементи формули (2.4.5), використовуючи прийняті позначення (рис. 2.4.1):

$$(\Delta C/\Delta t) = (C_{k+1,1} - C_{k,1})/\Delta t;$$

$$\begin{aligned}
\Delta^2 C/\Delta r^2 &= [(\Delta C/\Delta r)_П - (\Delta C/\Delta r)_Л]/\Delta r = [(C_{k,2} - C_{k,1})/\Delta r - 0]/\Delta r = \\
&= (C_{k,2} - C_{k,1})/\Delta r^2;
\end{aligned}$$

$$C = C_{k,1}.$$

Підставивши ці вирази в формулу (2.4.5) і вирішивши її відносно $C_{k+1,1}$, отримаємо:

$$C_{k+1,1} = (1 - 2a + k_H \Delta t)C_{k,1} + 2aC_{k,2}. \quad (2.4.6)$$

Не важко здогадатися, що формула (2.4.4) легко перетворюється на формулу (2.4.6) при $n=1$, що і треба було довести.

Формулу (2.4.4) можна спростити, прийнявши $a = 0,25$, тоді

$$C_{k+1,n} = (0,5 + k_H \Delta t) C_{k,n} + 0,25(b C_{k,n+1} + d C_{k,n-1}), \quad (2.4.7)$$

за умови $\Delta t = \Delta r^2 / (4D)$ і $\Delta t < 0,5 / (-k_H)$.

При розливі консервативної речовини ($k_H = 0$) формула (2.4.7) буде мати вигляд:

$$C_{k+1,n} = 0,5 C_{k,n} + 0,25(b C_{k,n+1} + d C_{k,n-1}). \quad (2.4.8)$$

2.4.2 Вихідні дані для розрахунку

Для розрахунку переносу й дифузії забруднювальних речовин при їх аварійних розливах необхідні такі вихідні дані:

об'єм розливу W_0 ;

характеристика розкладання розлитої речовини k_H ;

початкова C_0 і фоновая C_E концентрація речовини;

середня глибина на акваторії H_C ;

середня швидкість течії V_C (якщо вона є);

коефіцієнт турбулентної дифузії D .

2.4.3 Послідовність розрахунку

1. Визначається початковий радіус плями забруднення r_0 , виходячи з припущення, що витиснення чистої води стічною водою з концентрацією домішки C_0 відбувається до дна водойми:

$$r_0 = \sqrt{W_0 / \pi H_C}. \quad (2.4.9)$$

2. За величиною r_0 визначається ширина кілець Δr з урахуванням такої вимоги:

$$\Delta r = r_0 / n_0; \quad n_0 = 1, 2, 3, \dots \quad (2.4.10)$$

3. Розраховуються крок у часі Δt і параметри b і d для кожного n -ного кільця:

$$\Delta t = \Delta r^2 / (4D); \quad (2.4.11)$$

$$b = 2n / (2n - 1); \quad (2.4.12)$$

$$d = 2(n - 1) / (2n - 1). \quad (2.4.13)$$

Загальна кількість кілець для розрахунку дорівнює $n_0 + N$, де N – кількість інтервалів Δt у розрахунковому періоді часу.

4. Розрахунок ведеться у табличному вигляді (табл. 2.4.1). В n_0 перших кілець, починаючи від центра плями, записується початкова концентрація C_0 . За формулою (2.4.7) або (2.4.8) розраховується концентрація речовини в наступний момент часу (через Δt). Розрахунок ведеться покроково від одного моменту часу до другого в межах усього розглядуваного періоду часу.

5. В усі моменти часу для консервативної речовини повинна виконуватися умова:

$$C_0 \sum_{i=1}^{n_0} (2i - 1) = \sum_{i=1}^{n_k} C_{ki} (2i - 1), \quad (2.4.14)$$

де n_k – кількість кілець у плямі забруднення в k -тий момент часу.

6. При наявності речовини у фоні розрахунок виконується в перевищеннях над фоном ($C_p = C - C_E$).

7. Якщо розміри кілець дуже малі, то розрахунок виконується до моменту часу, коли забруднення поширюється на 20-50 кілець. Після цього кільця об'єднуються по $\mu=2,3,\dots$ (нова ширина кілець Δr_2 дорівнює $\mu \Delta r_1$). Концентрація осереднюється із врахуванням площі кілець

$$C_{2kj} = \frac{\sum_{i=1}^{j\mu} C_{1ki} (2i - 1)}{(j-1)\mu + 1} \bigg/ \frac{\sum_{i=1}^{j\mu} (2i - 1)}, \quad \text{при } j = 1, 2, \dots, n_k/\mu,$$

де C_{2kj} – концентрація в j -тому кільці, нова ширина якого Δr_2 в k -тий момент часу.

Визначається новий крок у часі $\Delta t_2 = \mu^2 \Delta t_1$ і розрахунок продовжується. При необхідності збільшення можна повторити.

Контрольні запитання

17. Запишіть модель розповсюдження речовини при аварійних розливах?
18. Запишіть розрахункову формулу, при яких умовах вона виконується?
19. Які дані необхідні для розрахунку розводження аварійних розливів речовини?
20. Як визначається розмір кілець?
21. Яка послідовність розрахунку?
22. Як виконується контроль розрахунку?
23. Як виконується збільшення кілець?

Завдання для самостійної роботи

Розрахувати поле концентрацій забруднювальної речовини у плямі через період часу $10\Delta t$ (табл. 2.4.1). Визначити максимальну концентрацію домішки у плямі в цей період часу, радіус плями та її площу. Оформлену роботу подати до захисту. Робота повинна містити: розрахункові формули, вихідні дані, результати розрахунку у табличному вигляді та висновок.

Таблиця 2.4.1 - Вихідні дані по варіантах

Показник	Значення показників по варіантах									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
W_0	410	550	920	1050	1450	460	820	500	1600	960
H_C	3,60	3,50	6,60	4,45	5,50	3,40	4,50	3,45	5,40	4,35
D	0,0015	0,0020	0,0035	0,0040	0,0042	0,0012	0,0018	0,0018	0,0036	0,0035
C_0	100	110	120	130	140	150	90	160	170	180
C_E	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Приклад розрахунку

ВИХІДНІ ДАНІ. Первинний розлив складає 450 м^3 , середня глибина на акваторії – $3,2 \text{ м}$, $D = 0,0031 \text{ м}^2/\text{сек}$, $C_0 = 110 \text{ мг/дм}^3$, $C_E = 12 \text{ мг/дм}^3$.

РІШЕННЯ.

1. Радіус плями одразу після розливу дорівнює:

$$r_0 = (450 / (3,2 * 3,14))^{0,5} = 6,69 \text{ (м)}.$$

2. Тоді Δr приймаємо рівним ($n_0 = 2$)

$$\Delta r = 6,69 / 2 = 3,35 \text{ (м)}.$$

3. Крок у часі буде дорівнювати

$$\Delta t = 3,35^2 / (4 * 0,0031) = 15,05 \text{ (мін)}.$$

4. Фонова концентрація речовини дорівнює 12 мг/дм^3 , тоді перевищення над фоном у початковий момент часу буде дорівнювати $110 - 12 = 98 \text{ (мг/дм}^3)$.

У табл. 2.4.2 в перший стовпець ($k = 0$) у кільця з номерами 1 і 2 записуємо 98, в інші – 0.

Розрахунок дифузії плями (табл. 2.4.2) виконується за формулою (2.4.8):

$$C_{2,2} = 0,5 * 65,3333 + 0,1667 * 98,0000 + 0,3333 * 19,6000 = 55,5333 \text{ (мг/дм}^3) \dots$$

В усі моменти часу контрольна сума концентрацій речовини повинна дорівнювати $98 * (1+3) = 392 \text{ (мг/дм}^3)$.

ВИСНОВОК. По табл. 2.4.2 видно, що максимальна концентрація речовини у плямі у момент часу $10\Delta t$ дорівнює $31,2 + 12 = 43,2 \text{ (мг/дм}^3)$, радіус плями складає $11\Delta r = 11 * 3,35 = 36,8 \text{ (м)}$ та її площа 4250 м^2 .

Перелік посилань

1. Караушев А. В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеиздат, 1969.– 461 с.
2. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. – Л.: Гидрометеиздат, 1987.
3. Полетаєва Л.М., Юрасов С.М., Ільїна В.Г. Конспект лекцій з дисципліни «Моделювання і прогнозування стану довкілля» для студентів спеціальності «Екологія та охорона навколишнього середовища». – Одеса: ОДЕКУ, 2003. – 150 с.

2.5 Розрахунок розповсюдження речовини у водному середовищі при аварійних розливах (прямокутні координати)

2.5.1 Розв'язання диференціального рівняння

Представимо пляму забруднення при аварійному розливі плаваючої речовини (нафти) у виді квадрата. Тоді модель розповсюдження цієї речовини в прямокутних координатах у плоскій постановці задачі при розміщенні початку системи координат у центрі плями забруднення разом з граничними й початковими умовами можна записати у вигляді:

$$\partial C / \partial t = D(\partial^2 C / \partial x^2 + \partial^2 C / \partial y^2) + k_H C; \quad (2.5.1)$$

$$C(t, x, z) = C_0, \text{ при } t = 0, |x| \leq a/2 \text{ та } |z| \leq b/2;$$

$$C(t, x, z) = C_E, \text{ при } t = 0, |x| > a/2 \text{ та } |z| > b/2,$$

де k_H – коефіцієнт неконсервативності речовини;

C_0 – концентрація речовини в початковий момент часу у плямі;

C_E – фонові концентрація речовини;

a і b – лінійні розміри плями в початковий момент часу.

При контакті з берегом може спостерігатись, або відток нафти з плями за рахунок її виносу хвилями на берег у смугі прибою, або відсутність відтоку, якщо хвилювання немає або берег вертикальний:

$$-D \partial C / \partial x|_{ГР} = -D \partial C / \partial z|_{ГР} = q, \quad (2.5.2)$$

або

$$\partial C / \partial x|_{ГР} = \partial C / \partial z|_{ГР} = 0, \quad (2.5.3)$$

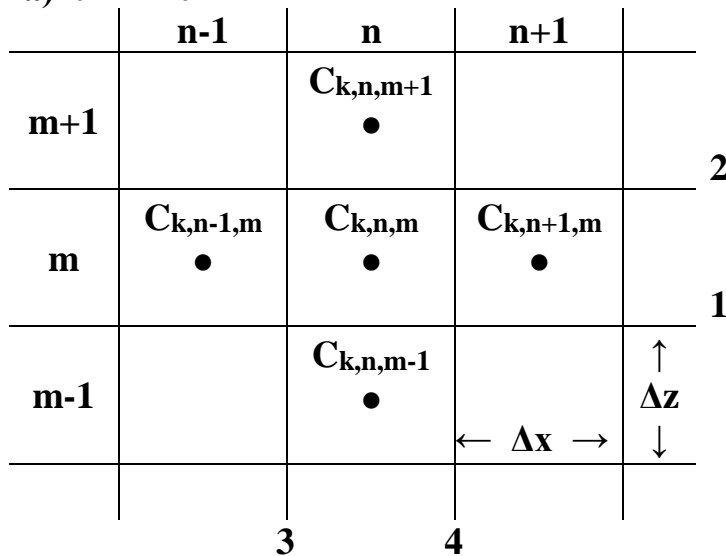
де q - одиничний стік нафти на берег, $г/(с*м)$.

Вирішимо рівняння (2.5.1) методом кінцевих елементів, для чого нанесемо на поверхню плями сітку (рис.2.5.1), розміри осередків якої $\Delta x = \Delta z$. Середні концентрації нафти в кожному осередку позначимо буквою C . Пронумеруємо тепер клітки і відповідні значення концентрації нафти в них в пространстві і в часі: нумерацію по осі OX позначимо індексом n ; по осі OZ – m , а нумерацію моментів часу – k . Значення концентрації $C_{k,n,m}$ означає, що концентрація нафти в осередку з координатами n,m на плямі розглядається в момент часу $k\Delta t$, а $C_{k+1,n,m}$ концентрація у тому ж осередку в наступний момент часу $(k+1)\Delta t$.

Запишемо рівняння (2.5.1) в формі кінцевих різностей для клітини з концентрацією $C_{k,n,m}$:

$$\Delta C / \Delta t = D(\Delta^2 C / \Delta x^2 + \Delta^2 C / \Delta z^2) + k_H C_{k,m,n} . \quad (2.5.4)$$

а) $t = k\Delta t$



б) $t = (k+1)\Delta t$

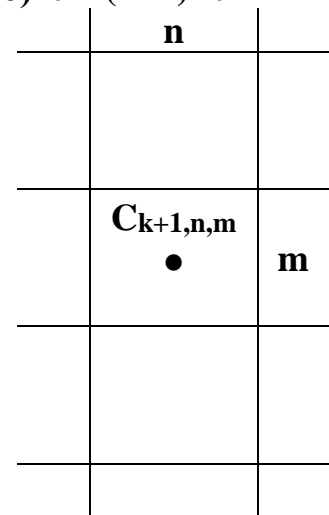


Рис. 2.5.1 Схема розв'язання диференціального рівняння

Використовуючи прийняті позначення виразимо перші похідні концентрації по t, z, x :

$$\Delta C / \Delta t = (C_{k+1,n,m} - C_{k,n,m}) / \Delta t, \quad (2.5.5)$$

$$(\Delta C / \Delta z)|_1 = (C_{k,n,m} - C_{k,n,m-1}) / \Delta z, \quad (2.5.6)$$

$$(\Delta C / \Delta z)|_2 = (C_{k,n,m+1} - C_{k,n,m-1}) / \Delta z, \quad (2.5.7)$$

$$(\Delta C / \Delta x)|_3 = (C_{k,n,m} - C_{k,n-1,m}) / \Delta x, \quad (2.5.8)$$

$$(\Delta C / \Delta x)|_4 = (C_{k,n+1,m} - C_{k,n,m}) / \Delta x. \quad (2.5.9)$$

Запишемо тепер другі похідні:

$$\begin{aligned} (\Delta C / \Delta z^2) &= [(\Delta C / \Delta z)|_2 - (\Delta C / \Delta z)|_1] / \Delta z = \\ &= (C_{k,n,m+1} + C_{k,n,m-1} - 2C_{k,n,m}) / \Delta z^2, \end{aligned} \quad (2.5.10)$$

$$\begin{aligned} (\Delta^2 C / \Delta x^2) &= [(\Delta C / \Delta z)|_4 - (\Delta C / \Delta z)|_3] / \Delta z = \\ &= (C_{k,n+1,m} + C_{k,n-1,m} - 2C_{k,n,m}) / \Delta x^2. \end{aligned} \quad (2.5.11)$$

Підставляючи (2.5.5), (2.5.10) і (2.5.11) в (2.5.4) і вирішуючи відносно $C_{k+1,n,m}$ отримаємо:

$$\begin{aligned} C_{k+1,n,m} &= a(C_{k,n,m+1} + C_{k,n+1,m} + C_{k,n-1,m} + C_{k,n,m-1}) + \\ &+ (1 - k_H \Delta t - 4a)C_{k,n,m}, \end{aligned} \quad (2.5.12)$$

де $a = D \Delta t / \Delta z^2$; $\Delta x = \Delta z$.

Аналогічно вирішимо диференційне рівняння при контакті плями з берегом.

Припустимо, що контакт відбувся на межі 3, тоді на цієї межі стік нафти $(-D \partial C / \partial x)|_3$ буде або дорівнювати нулю, або дорівнювати $-q$.

Із виразів (2.5.5) – (2.5.11) необхідно переписати тільки (2.5.8) и (2.5.11):

$$(-D \Delta C / \Delta x)|_3 = 0 \quad \rightarrow \quad (\Delta C / \Delta x)|_3 = 0, \quad (2.5.13)$$

або

$$(-D \Delta C / \Delta x)|_3 = -q \quad \rightarrow \quad (\Delta C / \Delta x)|_3 = q / D; \quad (2.5.14)$$

звідки

$$(\Delta^2 C / \Delta x^2) = (C_{k,n+1,m} - C_{k,n,m}) / \Delta x^2 \quad (2.5.15)$$

або

$$(\Delta^2 C / \Delta x^2) = (C_{k,n+1,m} - C_{k,n,m} - q \Delta x / D) / \Delta x^2. \quad (2.5.16)$$

Підставляючи (2.5.5), (2.5.10) і (2.5.15) в (2.5.4) отримаємо рішення при відсутності стоку нафти на берег:

$$C_{k+1,n,m} = a(C_{k,n+1,m} + C_{k,n,m+1} + C_{k,n,m-1}) + (1 - k_H \Delta t - 3a)C_{k,n,m}. \quad (2.5.17)$$

При наявності стоку нафти підставимо (2.5.5), (2.5.10) і (2.5.16) в (2.5.4), тоді

$$C_{k+1,n,m} = a(C_{k,n+1,m} + C_{k,n,m+1} + C_{k,n,m-1} - q \Delta z / D) + (1 - k_H \Delta t - 3a)C_{k,n,m}, \quad (2.5.18)$$

де $a = D\Delta t / \Delta z^2$; $\Delta z = \Delta x$.

Неважко помітити, що формула (2.5.12) легко перетворюється в формулу (2.5.17) при

$$C_{k,n-1,m} = C_{k,n,m}. \quad (2.5.19)$$

Аналогічно (2.5.12) можна перебудувати в формулу (2.5.18) при

$$C_{k,n-1,m} = (C_{k,n,m} - q\Delta z/D). \quad (2.5.20)$$

Таким чином, якщо відбувається контакт плями з берегом, то в наступний момент часу в осередках, які примикають до берега, розрахунок концентрації нафти можна виконувати за (2.5.12), умовно розповсюджуючи сітку на берег і припускаючи, що в осередку на березу концентрація нафти визначається за виразом (2.5.19) або (2.5.20).

Формулу (2.5.12) (аналогічно (2.5.17) та (2.5.18)) можна спростити, прийнявши $a = 0,125$, тоді:

$$C_{k+1,n,m} = 0,125(C_{k,n,m+1} + C_{k,n+1,m} + C_{k,n-1,m} + C_{k,n,m-1}) + (0,5 - k_n \Delta t) C_{k,n,m}, \quad (2.5.21)$$

при $\Delta t = \Delta z^2 / (8D)$.

2.5.2 Вихідні дані для розрахунку

Для розрахунку переносу й дифузії нафти при її аварійних розливах необхідні такі вихідні дані:

- об'єм розливу W_0 або його маса M_0 ;
- характеристика розкладання розливої нафти k_n ;
- середня глибина на акваторії H_c ;
- середня швидкість вітру V_v ;
- щільність нафти ρ_n і води ρ_v ;
- коефіцієнт Шезі C .

2.5.3 Послідовність розрахунку

1. Визначається вихідний радіус плями забруднення r_n , виходячи з припущення, що товщина нафтової плями в момент розливу складає 0,1 м:

$$r_n = \sqrt{W_0/\pi/0,1} = \sqrt{M_0/\rho_n/\pi/0,1}. \quad (2.5.22)$$

2. За формулою Блокера розраховується діаметр плями D_0 в момент закінчення гравітаційного розтікання нафти:

$$D_0^3 = D_H^3 + 24 K t W_0 (\rho_B - \rho_H) \rho_H / \pi / \rho_B, \quad (2.5.23)$$

де D_0 і D_H – діаметр плями в момент часу t і вихідний;
 K – константа Блокера, приймається рівної 15000 хв^{-1} ;
 t – період часу, коли закінчується гравітаційне розтикання, приймається рівним 60 хвилинам;
 ρ_B і ρ_H – щільність води ($1,02 \text{ т/м}^3$) і нафти ($0,85 \text{ т/м}^3$).

3. По величині r_0 визначається довжина сторони b рівновеликого квадрата:

$$b = (\pi)^{0,5} r_0. \quad (2.5.24)$$

4. Далі визначається крок у просторі $\Delta z = \Delta x$:

$$\Delta z = b / n_0; \quad n_0 = 1, 2, 3, \dots$$

5. Розраховується крок у часі:

$$\Delta t = \Delta z^2 / (8D). \quad (2.5.25)$$

6. Коефіцієнт турбулентної дифузії розраховується за формулою:

$$D = g H V_T / (M C), \quad (2.5.26)$$

$$M = \begin{cases} 0,7C + 6, & \text{при } C < 60; \\ 48, & \text{при } C \geq 60. \end{cases}$$

7. Для оцінки D і відстані, на яке відноситься пляма забруднення від місця аварійного розливу речовини, розраховується середня швидкість течії V_T (м/с) за формулою:

$$V_T = k V_B \sqrt{3 + 10 h}, \quad (2.5.27)$$

де k – коефіцієнт, який залежить від коефіцієнта Шезі C , визначається за табл. 1;

V_B – швидкість вітру на висоті 2 м над водною поверхнею;

h – середня для ділянки висота хвилі 1%-ной забезпеченості в даній системі хвиль.

Таблиця 2.5.1 – Визначення значення k в залежності від коефіцієнта Шезі C

C	10	20	30	40	50	60	80	90	1000
---	----	----	----	----	----	----	----	----	------

k	0,0010	0,0018	0,0027	0,0034	0,0042	0,0050	0,0060	0,0064	0,0068
---	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

8. Розраховується початкова концентрація C_0 :

$$C_0 = W_0 * \rho_H / b^2, \quad (2.5.28)$$

9. В n_0^2 клітинок, починаючи від центра плями, записується початкова концентрація C_0 . Далі за формулою (2.5.21) розраховується концентрація речовини в наступний момент часу (через Δt). Розрахунок ведеться покроково від одного моменту часу до другого в межах усього розглядуваного періоду часу.

10. Розрахунок ведеться у перевищеннях над фоном ($C - C_E$). В усі моменти часу для консервативної речовини сума концентрацій речовини у плямі забруднення повинна бути постійною (дорівнювати $n_0^2 C_0$).

11. При необхідності врахування випаровування нафти виконується за формулою :

$$C = C^* \{1 - \delta u [1 - \exp(-kt)]\}, \quad (2.5.29)$$

де C – концентрація нафти з урахуванням випаровування;

C^* – концентрація нафти без урахування випаровування;

δu – об'єм повного випарювання легких фракцій по відношенню до початкового об'єму, в долях одиниці;

$$k = \ln(2/\tau);$$

τ – інтервал часу, за який відбувається випарювання половини легких фракцій (по аналогії з періодом напіврозпаду).

Контрольні запитання

24. Запишіть модель розповсюдження речовини при аварійних розливах у прямокутних координатах.
25. Запишіть розрахункову формулу, при яких умовах вона виконується?
26. Які дані необхідні для розрахунку розводження аварійних розливів речовини?
27. Як визначається розмір клітинок?
28. Яка послідовність розрахунку?
29. Як виконується контроль розрахунку?

Завдання для самостійної роботи

Розрахувати поле концентрацій забруднювальної речовини у плямі через період часу $5\Delta t$ (табл. 2.5.2). Визначити максимальну концентрацію

домішки у плямі в цей період часу, ширину і довжину плями та її площу. Оформлену роботу подати до захисту. Робота повинна містити: розрахункові формули, вихідні дані, результати розрахунку у табличному вигляді та висновок.

Таблиця 2.5.2 - Вихідні дані по варіантах

Показ- ник	Значення показників по варіантах									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Mo, т	10	12	8	16	6	15	18	4	5	2
D, м²/с	0,015	0,020	0,035	0,040	0,042	0,012	0,018	0,018	0,036	0,035
ρн, т/м³	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
ρв, т/м³	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02

Приклад розрахунку

ВИХІДНІ ДАНІ. Первинний розлив складає 14 т, $D = 0,013 \text{ м}^2/\text{с}$; щільність нафти $\rho_n = 0,85 \text{ т/м}^3$ і води $\rho_v = 1,02 \text{ т/м}^3$.

РІШЕННЯ.

1. Радіус плями одразу після розливу дорівнює:

$$r_0 = \sqrt{(14 / 0,85 / (0,1 * 3,14))^{0,5}} = 7,24 \text{ (м)}.$$

2. Через одну годину після розливу діаметр плями буде дорівнювати:

$$D_0^3 = (14,5^3 + 24 * 15000 * 60 * 14 (1,02 - 0,85) * 0,85 / 1,02 / 3,14)^{1/3} = 252,0 \text{ (м)}.$$

3. Тоді, значення b складе:

$$b = (3,14)^{0,5} * 126 = 223 \text{ (м)}.$$

4. Крок у просторі $\Delta z = \Delta x$ буде дорівнювати:

$$\Delta z = \Delta x = 223 / 4 = 55,8 \text{ (м)}.$$

5. Крок у часі буде складати

$$\Delta t = 55,8^2 / (8 * 0,013) = 8,32 \text{ (г)}.$$

6. Початкова концентрація речовини буде дорівнювати:

$$C_0 = 14\ 000\ 000 / 223^2 = 282 \text{ (г/м}^2\text{)}.$$

На рис. 2.5.2 при $k = 0$ у шістнадцять клітинок записується значення початкової концентрації $C_0 = 282 \text{ г/м}^2$.

Розрахунок дифузії плями (рис. 2.5.2) виконується за формулою (2.5.21) при $k_n = 0$:

$$C_{2,3,3} = 0,5 * 0 + 0,125(35,250 + 35,250 + 0 + 0) = 8,813 \text{ (г/дм}^3\text{)} \dots$$

k = 0
k = 2

k = 1

282	282	282	282		$C_{1;-3;3=0}$	35,250	35,250	35,250	35,250	$C_{1;3;3=0}$		
282	282	282	282		35,250	211,500	246,750	246,750	211,500	35,250		
282	282	282	282		35,250	246,750	282,000	282,000	246,750	35,250		
282	282	282	282		35,250	246,750	282,000	282,000	246,750	35,250		
$\Sigma = 4512$						35,250	211,500	246,750	246,750	211,500	35,250	
					$C_{1;-3;3=0}$	35,250	35,250	35,250	35,250	$C_{1;3;3=0}$		

$\Sigma = 4512$

k = 3

k = 4

0,551	0,551	0	$C_{3;4;5}$	$C_{3;5;5}$		0,069	0,069	0	$C_{4;4;6}$	$C_{4;5;6}$	$C_{4;6;6}$		
10,465	8,813	1,652	0	$C_{3;5;4}$		1,721	1,446	0,275	0	$C_{4;5;5}$	$C_{4;6;5}$		
69,949	55,078	16,523	1,652	0		16,455	12,875	3,993	0,413	0	$C_{4;6;4}$		
201,035	155,320	55,078	8,813	0,551		77,041	58,865	22,444	3,993	0,275	0		
259,969	201,035	69,949	10,465	0,551		186,302	141,688	58,865	12,875	1,446	0,069		
$\Sigma = 4512$						245,235	186,302	77,041	16,455	1,721	0,069		

Σ

= 4512

k = 5

0,009	0,009	0	$C_{5;4;7}$	$C_{5;5;7}$	$C_{5;6;7}$	$C_{5;7;7}$
0,267	0,224	0,043	0	$C_{5;5;6}$	$C_{5;6;6}$	$C_{5;7;6}$
3,322	2,590	0,818	0,086	0	$C_{5;6;5}$	$C_{5;7;5}$
21,739	16,532	6,497	1,205	0,086	0	$C_{5;7;4}$
80,853	61,188	26,937	6,497	0,818	0,043	0
174,434	132,136	61,188	16,532	2,590	0,224	0,009
230,502	174,434	80,853	21,739	3,322	0,267	0,009

$\Sigma = 4512$

Примітка: У моменти часу $k = 2, 3, 4$ і 5 приведено праву верхню чверть плями забруднення, тому що вона має центр симетрії (жирна крапка на плямі).

Рис. 2.5.2 Розрахунок дифузії плями забруднення

В усі моменти часу контрольна сума концентрацій речовини повинна дорівнювати $282 * 4^2 = 4512$ (мг/дм³).

ВИСНОВОК. По рис. 2.5.2 видно, що через $5\Delta t = 5 * 8,32 = 41,6$ години після розливу максимальна концентрація речовини у плямі дорівнює 231 (мг/дм³), ширина плями складає $14\Delta x = 14 * 55,8 = 781$ (м) та її площа – 0,349 км².

Перелік посилань

6. Караушев А. В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеиздат, 1969.– 461 с.
7. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. – Л.: Гидрометеиздат, 1987.

2.6 Спрощені методи розрахунку розводження стічних вод в потоках

Спрощені методи розрахунку розводження стічних вод у потоках засновані на апроксимації результатів розрахунків, які виконані детальними методами.

Спрощені методи використовуються при оперативній оцінці розповсюдження забруднювальних речовин у потоках і при проектуванні на стадії техніко-економічних розрахунків та обґрунтувань (ТЕР та ТЕО), коли порівнюється велика кількість варіантів будівництва об'єкту. Одержані цими методами результати розглядаються як орієнтовні. В подальшому їх необхідно відкоректувати за допомогою детальних розрахунків.

2.6.1 Метод УралНДІВГ

Метод дозволяє визначити концентрацію забруднювальної речовини у річках нижче зосереджених стаціонарних випусків при їх різному розташуванні.

2.6.1.1 Випуск у середині потоку (початок координат у точці випуску):

$$C_i = \frac{Q_{ст} C_{ст}}{4\pi V P X^{3/2} \Phi(\xi_1/2) \Phi(\xi_2/2)} \exp\left[-\frac{Y^2 + Z^2}{P X^{3/2}} + k_H \frac{X}{V}\right] + C_E \exp\left[k_H \frac{X}{V}\right]. \quad (2.6.1)$$

2.6.1.2 Береговий випуск (початок координат у точці випуску):

$$C_i = \frac{Q_{\text{СТ}} C_{\text{СТ}}}{\pi V P X^{3/2} \Phi(\xi_3/2) \Phi(\xi_4/2)} \exp\left[-\frac{Y^2 + Z^2}{P X^{3/2}} + k_H \frac{X}{V}\right] + C_E \exp\left[k_H \frac{X}{V}\right]. \quad (2.6.2)$$

2.6.1.3 Випуск у точці потоку на відстані b от берега і h від поверхні (початок координат у середині потоку $0,5B$ і $0,5H$):

$$C_i = \frac{Q_{\text{СТ}} C_{\text{СТ}}}{\pi V P X^{3/2} [\Phi(\xi_5/2) + \Phi(\xi_6/2)][\Phi(\xi_7/2) + \Phi(\xi_8/2)]} * \exp\left[-\frac{(Y + h - 0,5H)^2 + (Z + b - 0,5B)^2}{P X^{3/2}} + k_H \frac{X}{V}\right] + C_E \exp\left[k_H \frac{X}{V}\right], \quad (2.6.3)$$

де C_i – концентрація забруднювальної речовини у точці с координатами X (відстань уздовж потоку від джерела забруднення) Y (глибина) і Z (ширина);

$Q_{\text{СТ}}$ – витрата стічних вод, які надходять до річки;

$C_{\text{СТ}}$ – концентрація забруднювальної речовини у стічних водах;

B – середня ширина потоку;

H – середня глибина потоку;

V – середня швидкість річки;

k_H – коефіцієнт неконсервативності;

C_E – фонові концентрація речовини;

$\Phi(\xi/2)$ – інтеграл імовірності, визначається по табл. 2.6.1;

P – розмірний коефіцієнт пропорційності, розраховується по формулі:

$$P = 0,026 B^{1/2} (2g)^{1/4} / (CH^{3/4}); \quad (2.6.4)$$

$$\xi_1 = B / [(2P)^{1/2} X^{3/4}]; \quad \xi_2 = H / [(2P)^{1/2} X^{3/4}]; \quad (2.6.5)$$

$$\xi_3 = B \sqrt{2} / [P^{1/2} X^{3/4}]; \quad \xi_4 = H \sqrt{2} / [P^{1/2} X^{3/4}]; \quad (2.6.6)$$

$$\xi_5 = b \sqrt{2} / [P^{1/2} X^{3/4}]; \quad \xi_6 = (B - b) \sqrt{2} / [P^{1/2} X^{3/4}]; \quad (2.6.7)$$

$$\xi_7 = h \sqrt{2} / [P^{1/2} X^{3/4}]; \quad \xi_8 = (H - h) \sqrt{2} / [P^{1/2} X^{3/4}]. \quad (2.6.8)$$

Відстань до перетину достатнього перемішування (співвідношення $C_{\text{МАХ}}$ і $C_{\text{МІН}}$ не більш 1,25) визначається за формулами:

$$H^2 + B^2$$

$$X_D = \left[\frac{\quad}{4P \ln(C_{MAX} / C_{MIN})} \right]^{2/3}; \quad (2.6.9)$$

$$X_D = \left[\frac{H^2 + B^2}{P \ln(C_{MAX} / C_{MIN})} \right]^{2/3}; \quad (2.6.10)$$

$$X_D = \left[\frac{(H - h)^2 + (B - b)^2}{P \ln(C_{MAX} / C_{MIN})} \right]^{2/3}. \quad (2.6.11)$$

Формули (2.6.9) – (2.6.11) застосовуються у випадках, які згадани у п.п. 2.6.1.1 – 2.6.1.3.

Метод придатний в умовах прямолінійності слабозвивистих малих потоків. В інших умовах результати треба розглядати як орієнтовні.

Таблиця 2.6.1 Інтеграл імовірності $\Phi(\xi/2)$

$\Phi(\xi/2)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,000	0040	0080	0120	0160	0199	0239	0279	0319	0359
0,1	0398	0438	0478	0517	0557	0596	0636	0675	0714	0753
0,2	0793	0832	0871	0910	0948	0987	1026	1064	1103	1141
0,3	1179	1217	1255	1293	1331	1368	1405	1443	1480	1517
0,4	1554	1591	1628	1664	1700	1736	1772	1808	1844	1879
0,5	1915	1950	1985	2019	2054	2088	2123	2157	2190	2224
0,6	2257	2291	2324	2357	2389	2422	2454	2486	2517	2549
0,7	2580	2611	2642	2673	2704	2738	2764	2794	2823	2852
0,8	2881	2910	2939	2967	2995	3023	3050	3078	3106	3133
0,9	3159	3186	3212	3238	3264	3289	3315	3340	3365	3389
1,0	3413	3438	3461	3485	3508	3531	3554	3577	3599	3621
1,1	3643	3665	3686	3708	3729	3749	3770	3790	3810	3830
1,2	3849	3869	3888	3907	3925	3944	3962	3980	3997	4015
1,3	4032	4049	4066	4082	4099	4115	4131	4147	4162	4177
1,4	4192	4207	4222	4236	4251	4265	4279	4292	4306	4319
1,5	4332	4345	4357	4370	4382	4394	4406	4418	4429	4441
1,6	4452	4463	4474	4484	4495	4505	4515	4525	4535	4545
1,7	4554	4564	4573	4582	4591	4599	4608	4616	4625	4633
1,8	4641	4649	4656	4664	4671	4678	4685	4693	4699	4706
1,9	4713	4719	4726	4732	4738	4744	4750	4756	4761	4767
2,0	4772	4778	4783	4788	4793	4798	4803	4808	4812	4817
2,1	4821	4826	4830	4834	4838	4842	4846	4850	4854	4857
2,2	4861	4864	4868	4871	4875	4878	4881	4884	4887	4890

2,3	4893	4896	4898	4901	4904	4906	4908	4911	4913	4916
2,4	4918	4920	4922	4925	4927	4929	4931	4932	4934	4936
2,5	4938	4940	4941	4943	4945	4946	4948	4949	4951	4952
2,6	4953	4955	4956	4957	4958	4960	4961	4962	4963	4964
2,7	4965	4966	4967	4968	4969	4970	4971	4972	4973	4974
2,8	4974	4975	4976	4977	4977	4978	4978	4979	4980	4981
2,9	4981	4982	4982	4983	4984	4984	4985	4985	4986	4986
3,0	4986	4986	4987	4987	4988	4989	4989	4989	4990	4990
3,1	4990	4991	4991	4991	4992	4992	4992	4992	4993	4993
3,2	4993	4993	4994	4994	4993	4994	4994	4995	4995	4995
3,3	4995	4995	4996	4996	4996	4996	4996	4996	4996	4996
3,4	4997	4997	4997	4997	4997	4997	4997	4997	4998	4998
3,5	4998	4998	4998	4998	4998	4998	4998	4998	4998	4998
3,6	4998	4998	4998	4999	4999	4999	4999	4999	4999	4999

2.6.2 Метод Талінського політехнічного інституту (ТПІ)

Метод засновано на аналітичному рішенні рівняння турбулентної дифузії відповідно до найпростішого випадку. Метод дозволяє розрахувати максимальну концентрацію неконсервативної речовини у будь-якому заданому перетині.

2.6.2.1 Випуск знаходиться на відстані b від берега

$$C_{\text{MAX}} = C_E + \frac{Q_{\text{ст}} C_{\text{ст}}}{H (\pi V D_Z X)^{1/2}} \frac{1}{[\Phi(\xi_1 \sqrt{2}) + \Phi(\xi_2 \sqrt{2})]} \exp\left[k_H \frac{X}{V} \right], \quad (2.6.12)$$

де $\Phi(\xi \sqrt{2})$ – інтеграл імовірності, визначається по табл. 2.6.2;

$$\xi_1 = -bV^{1/2} / [2(D_Z X)^{1/2}]; \quad \xi_2 = (b - B)V^{1/2} / [2(D_Z X)^{1/2}]. \quad (2.6.13)$$

2.6.2.2 Випуск знаходиться у берега

$$C_{\text{MAX}} = C_E + \frac{Q_{\text{ст}} C_{\text{ст}}}{H (\pi V D_Z X)^{1/2}} \frac{1}{\Phi(\xi_3 \sqrt{2})} \exp\left[k_H \frac{X}{V} \right], \quad (2.6.14)$$

де $\xi_3 = BV^{1/2} / [2(D_Z X)^{1/2}]$. (2.6.15)

2.6.2.3 Випуск знаходиться у середині потоку

$$C_{\text{MAX}} = C_E + \frac{Q_{\text{ст}} C_{\text{ст}}}{H (\pi V D_Z X)^{1/2}} \frac{1}{\Phi(\xi_3 \sqrt{2})} \exp\left[k_H \frac{X}{V} \right], \quad (2.6.16)$$

$$2H (\pi V D_Z X)^{1/2} \Phi(\xi_4 \sqrt{2}) \quad V$$

де $\xi_4 = BV^{1/2} / [4(D_Z X)^{1/2}]$; (2.6.17)

D_Z – коефіцієнт дисперсії у поперечному напрямку (інші позначення ті ж, що і у п. 2.6.1).

Для невеликих річок ($B < 50-60$ м) D_Z розраховується за формулою:

$$D_Z = 41,6 R u^* / (Re)^{1/2}, \quad (2.6.18)$$

де R – гідравлічний радіус;

u^* – динамічна швидкість потоку, розраховується за формулою

$$u^* = (gRI)^{1/2} = V (g / C)^{1/2}; \quad (2.6.19)$$

Таблиця 2.6.2 Інтеграл імовірності $\Phi(\xi\sqrt{2})$

$\Phi(\xi\sqrt{2})$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,0000	01128	02256	03384	05411	05637	06752	07886	09008	10128
0,1	11246	12362	13476	14587	15695	16800	17901	18999	20094	21184
0,2	22270	23352	24430	25502	26570	27633	28690	29742	30788	31828
0,3	32863	33891	34913	35928	36936	37938	38933	39941	40901	41874
0,4	42839	43797	44747	45689	46622	47548	48466	49374	50275	51167
0,5	52050	52924	53790	54646	55494	56332	57162	57982	58729	59594
0,6	60386	61186	61941	62705	63459	64203	64938	65663	66378	67084
0,7	67780	68467	69143	69810	70486	71116	71754	72382	73001	73610
0,8	74210	74800	75381	75952	76514	77067	77610	78144	78669	79184
0,9	79691	80188	80677	81156	81627	82089	82542	82987	83423	83851
1,0	84281	84681	85084	85478	85865	86244	86614	86977	87333	87680
1,1	88020	88353	88679	88997	89308	89612	89910	90200	90484	90761
1,2	91031	91296	91530	91805	92050	92290	92524	92751	92973	93150
1,3	93401	93606	93806	94002	94191	94376	94556	94731	94902	95067
1,4	95228	95385	95538	95686	95830	95970	96105	96237	96365	96490
1,5	96610	96728	96841	96952	97059	97162	97263	97360	97455	97545
1,6	97635	97721	97804	97884	97962	98038	98110	98181	98249	98315
1,7	98379	98441	98500	98558	98614	98667	98719	98769	98817	98864
1,8	98909	98952	98994	99035	99074	99111	99147	99182	99216	99248

1,9	99532	99552	99572	99591	99609	99629	99642	99658	99673	99688
2,0	99532	99552	99572	99591	99609	99629	99642	99658	99673	99688
2,1	99702	99716	99728	99741	99752	99764	99775	99785	99795	99805
2,2	99814	99822	99831	99839	99846	99854	99861	99867	99874	99880
2,3	99886	99891	99897	99902	99906	99911	99916	99920	99924	99928
2,4	99931	99935	99938	99941	99944	99947	99950	99952	99955	99957
2,5	99959	99961	99963	99965	99967	99969	99971	99972	99974	99975
2,6	99976	99978	99979	99980	99981	99982	99983	99984	99985	99986
2,7	99987	99987	99988	99989	99989	99990	99991	99991	99992	99992
2,8	99992	99993	99993	99994	99994	99994	99995	99995	99995	99996
2,9	99996	99996	99996	99997	99997	99997	99997	99997	99998	99998
3,0	99998	99998	99998	99998	99998	99998	99998	99999	99999	99999

I – уклон водної поверхні потоку;

C – коефіцієнт Шезі;

Re – число Рейнольдса, розраховується за формулою

$$\mathbf{Re = R V / \nu,} \quad (2.6.20)$$

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості води.

Для річок з великою шириною ($B > 100$ м) значення D_z обчислюється за формулою:

$$\mathbf{D_z = (H V / 3524) (B / H)^{1,378}.} \quad (2.6.21)$$

Автори обмежують застосованість методу випадками порівняно невеликих водотоків з коефіцієнтом звивистості менш 1,5.

2.6.3 Експрес–метод ДГІ

Метод дозволяє обчислити відстань до перетину з заданою максимальною концентрацією речовини або знати її максимальну концентрацію на будь-якій відстані від місця скиду стічних вод.

Як характеристика концентрації забруднювальної речовини в будь-якому загальному перетині прийнято величину χ , яку названо показником розводження:

$$\mathbf{\chi = (C_{\max} - C_{\Pi}) / C_{\text{ст}},} \quad (2.6.22)$$

де C_{Π} – концентрація речовини у перетині достатнього перемішування.

Показник χ використовується як при постійної, так і при перемінної витраті води на ділянці, що розглядається.

Відстань до завданого значення χ визначається за формулою

$$X = 0,14Q_{\text{СТ}} V(N / \hat{H})^{1/2} / [\chi\phi(Q_{\text{СТ}} + Q_E)], \quad (2.6.23)$$

де $N = MC/g$;

C – коефіцієнт Шезі;

$$M = \begin{cases} 0,7C + 6, & \text{при } C < 60; \\ 48, & \text{при } C \geq 60. \end{cases} \quad (2.6.24)$$

$\hat{H} = H / V$ – відносна глибина;

$\phi = l_\phi / l_{\text{ПР}}$ – показник звивистості;

l_ϕ – довжина ділянки по фарватеру;

$l_{\text{ПР}}$ – довжина цієї ж ділянки по прямій.

Вирішуючі рівняння (2.6.23) відносно величини зворотної кратності розводження ($1/n = C_{\text{МАХ}} / C_{\text{СТ}}$), одержуємо:

$$C_{\text{МАХ}} / C_{\text{СТ}} = C_{\text{П}} / C_{\text{СТ}} + 0,14Q_{\text{СТ}} V(N / \hat{H})^{1/2} / [X\phi(Q_{\text{СТ}} + Q_E)]. \quad (2.6.25)$$

2.6.4 Метод ВОДГЕО

Метод дозволяє визначити максимальну концентрацію речовини на заданій відстані від скиду стічних вод.

У зоні потоку з великими концентраціями речовини $C_{\text{МАХ}}$ розраховується за формулою:

$$C_{\text{МАХ}} = C_E + (C_{\text{СТ}} - C_E) / n, \quad (2.6.26)$$

де $n = (C_{\text{СТ}} - C_E) / (C_{\text{МАХ}} - C_E)$ – показник кратності розводження.

Величина n пов'язана з коефіцієнтом змішування γ залежністю

$$n = (Q_{\text{СТ}} - \gamma Q_E) / Q_{\text{СТ}}. \quad (2.6.27)$$

Величина γ показує частку витрати річки, що бере участь у розводженні стічних вод. Вона визначається за формулою:

$$\gamma = (1 - \beta) / (1 + \beta Q_E / Q_{\text{СТ}}), \quad (2.6.28)$$

де $\beta = \exp(-a X^{1/3}); \quad (2.6.29)$

$$a = \zeta \phi (D / Q_{\text{СТ}})^{1/3}; \quad (2.6.30)$$

X – відстань по фарватеру від місця скиду стічних вод до перетину, що розглядається;

ζ – коефіцієнт, який залежить від розташування випуску стічних вод: при випуску біля берегу – $\zeta = 1,0$; на стрижні – $\zeta = 1,5$;

φ – коефіцієнт звивистості річки;

$$D = gHV / (MC); \quad (2.6.31)$$

C – коефіцієнт Шезі;

M – коефіцієнт, розраховується за формулою (2.6.24).

Для наближеного визначення відстані до перетину достатнього змішування пропонується формула:

$$X_{II} = \left\{ \frac{1}{a} \ln \left[\frac{(1 + \gamma Q_E / Q_{CT})}{(1 - \gamma)} \right] \right\}^3. \quad (2.6.32)$$

Створом достатнього змішування називається створ, у якому зі стічними водами перемішується 95, 90, 80 та ін. витрати річки ($\gamma = 0,95; 0,90; 0,80 \dots$).

Метод використовується при $0,0025 < Q_{CT} / Q_E < 0,1$. Як недолік слід визначити відсутність обліку фонові концентрації речовини при визначенні γ .

Контрольні запитання

1. На чому засновані спрощені методи розрахунку розводження стічних вод у потоках?
2. У яких випадках використовуються спрощені методи?
3. Для яких водотоків використовується метод УралНДІВГ?
4. Що дозволяє розрахувати метод УралНДІВГ?
5. Яку характеристику дозволяє визначити метод ТПІ?
6. Які існують обмеження для використання метода ТПІ?
7. Які величини розраховуються за допомогою методу ДПІ?
8. Як визначається показник розводження χ ?
9. У яких випадках використовується метод ВОДГЕО?
10. Який існує зв'язок між показником кратності розводження n і коефіцієнтом змішування γ ?
11. Охарактеризуйте створ достатнього змішування.

Завдання для самостійної роботи

Розрахувати поле концентрацій домішки у потоці на відстані 10 Δx від місця скиду стічних вод. Вирозити цю відстань у метрах. Визначити

максимальну концентрацію домішки у створі на відстані 10 Δх. Оформлену роботу подати до захисту. Робота повинна містити: розрахункові формули, вихідні дані, результати розрахунку у вигляді схеми. Вихідні дані для роботи наведені у табл. 2.6.3.

Таблиця 2.6.3 - Вихідні дані по варіантах

Показник	Значення показників по варіантах									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Q_E	1,76	2,77	1,48	1,36	1,65	1,40	2,05	1,21	0,96	1,39
C_E	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Q_{CT}	0,18	0,23	0,20	0,16	0,15	0,16	0,20	0,14	0,16	0,16
C_{CT}	100	110	120	130	140	150	90	80	145	135
V_C	0,12	0,20	0,14	0,13	0,15	0,15	0,18	0,15	0,14	0,19
B_C	27	30	20	26	24	26	25	20	20	24
H_C	0,60	0,50	0,60	0,45	0,50	0,40	0,50	0,45	0,40	0,34
C	30	25	30	25	30	25	30	25	30	25
φ	1,6	1,5	1,4	1,4	1,5	1,6	1,6	1,5	1,4	
Z_{CT}	13,5	15,0	10,0	13,0	12,0	13,0	12,5	10,0	10,0	12,0

Приклади розрахунків

1. Розрахунок методом УралНДІВГ

ВИХІДНІ ДАНІ. $Q_E = 23,0 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{CT} = 1,2 \text{ м}^3/\text{с}$; $B = 16 \text{ м}$; $H = 1,4 \text{ м}$; $V = 1,08 \text{ м}/\text{с}$; $C = 30 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$; $\varphi = 1,6$; $C_E = 0$; $C_{CT} = 100 \text{ г}/\text{м}^3$.

Випуск у середині потоку. Необхідно визначити C_{MAX} на відстані 250 м від місця скиду стічних вод (речовина консервативна $k_H = 0$).

РІШЕННЯ.

а) За формулою (2.6.4) розраховуємо коефіцієнт P :

$$P = 0,026 * (16)^{0,5} * (2 * 9,8)^{0,25} / (30 * 1,4^{0,75}) = 0,00566.$$

б) За формулою (2.6.5) розраховуємо ξ_1 й ξ_2 і визначаємо нормовані функції Лапласа $\Phi(\xi/2)$ по табл. 2.6.1:

$$\xi_1 = 16 / ((2 * 0,00566)^{0,5} * 250^{0,75}) = 2,39;$$

$$\Phi(2,39) = 0,492;$$

$$\xi_2 = 1,4 / ((2 * 0,00566)^{0,5} * 250^{0,75}) = 0,209;$$

$$\Phi(0,209) = 0,083.$$

в) За формулою (2.6.1) розраховуємо C_{MAX} :

$$C_{MAX} = 1,2 * 100 / (4 * 3,14 * 1,08 * 0,0057 * 250^{3/2} * 0,49 * 0,083) = 9,7 \text{ (г}/\text{м}^3\text{)}.$$

2. Розрахунок методом ТП

ВИХІДНІ ДАНІ ті ж, що і у прикладі 1.

РІШЕННЯ.

а) Розраховуємо коефіцієнт D_Z за формулою (2.6.18):

$$u_* = 1,08 * (9,8 / 30)^{1/2} = 1,89 \text{ (м/с)};$$

$$\nu = 0,0114 \text{ см}^2/\text{с} = 0,114 * 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с} \text{ (при } t = 15^\circ\text{C)};$$

$$R \approx 1,4 \text{ м (} R \approx H \text{ для трапецеїдальних та прямокутних перетинів)};$$

$$Re = 1,4 * 1,08 / (0,114 * 10^{-5}) = 13,3 * 10^5;$$

$$D_Z = 41,6 * 1,4 * 1,89 / (13,3 * 10^5)^{1/2} = 0,095 \text{ (м}^2/\text{с)}.$$

б) Визначаємо інтеграл імовірності $\Phi(\xi\sqrt{2})$ за формулою (2.6.17) і табл. 2.6.2:

$$\xi_4 = 16 * (1,08)^{1/2} / (4 * (0,095 * 250)^{1/2}) = 0,853;$$

$$\Phi(0,853) = 0,771.$$

в) Знаходимо C_{MAX} за формулою (2.6.16):

$$C_{\text{MAX}} = 1,2 * 100 / (2 * 1,4 * (3,14 * 1,08 * 250 * 0,095)^{1/2}) / 0,771 = \mathbf{6,2 \text{ (г/м}^3\text{)}}.$$

3. Розрахунок експрес-методом ДГІ

ВИХІДНІ ДАНІ ті ж, що і у прикладі 1.

РІШЕННЯ.

а) Знаходимо відносну глибину:

$$\hat{H} = 1,4 / 16 = 0,0875.$$

б) Визначаємо N :

$$N = (0,7 * 30 + 6) * 30 / 9,8 = 82,6.$$

в) Знаходимо $C_{\text{П}}$:

$$C_{\text{П}} = C_{\text{СТ}} Q_{\text{СТ}} / (Q_{\text{СТ}} + Q_{\text{Е}}) = 100 * 1,2 / (23,0 + 1,2) = 4,96 \text{ (г/м}^3\text{)}.$$

г) Розраховуємо C_{MAX} :

$$C_{\text{MAX}} = 100 * (4,96 / 100 + 0,14 * 1,2 * 16 * (82,6 / 0,0875)^{1/2} / (250 * 1,6 * (23,0 + 1,2))) = \mathbf{5,8 \text{ (г/м}^3\text{)}}.$$

4. Розрахунок методом ВОДГЕО

ВИХІДНІ ДАНІ ті ж, що і у прикладі 1.

РІШЕННЯ.

а) Визначаємо D за формулою (2.6.31):

$$D = 9,8 * 1,4 * 1,08 / ((0,7 * 30 + 6) * 30) = 0,018 \text{ (м}^2/\text{с)}.$$

б) Розраховуємо коефіцієнт a за формулою (2.6.30):

$$a = 1,5 * 1,6 * (0,018 / 1,2)^{1/3} = 0,592.$$

в) коефіцієнт γ знаходимо за формулою (2.6.28), попередньо визначивши за формулою (2.6.29) коефіцієнт β :

$$\beta = \exp(-0,592 * (250)^{1/3}) = \exp(-3,73) = 0,024.$$

$$\gamma = (1 - 0,024) / (1 + 0,024 * 23,0 / 1,2) = 0,668.$$

г) Розраховуємо n :

$$n = (1,2 + 0,668 * 23,0) / 1,2 = 13,8.$$

д) Визначаємо C_{MAX} за формулою (2.6.26):

$$C_{\text{MAX}} = 100 / 13,8 = \mathbf{7,25 \text{ (г/м}^3\text{)}}.$$

Перелік посилань

1. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод./Под ред.засл.деят.науки и техн., проф. А.В.Караушева. Изд. 2-ое. – Л.: Гидрометеиздат, 1987.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗ МІГРАЦІЇ ЗАБРУДНЮВАЧІВ У ГРУНТОВОМУ ТА РОСЛИННОМУ СЕРЕДОВИЩІ

3.1. Моделювання основних процесів життєдіяльності сільськогосподарських культур для урахування кількості врожаю

Сучасні уявлення про процес формування продуктивності агроecosystem стали основою для створення моделей продуктивності посівів різної складності. Розвиток теоретичних та експериментальних робіт по вивченню міграції поллютантів в ґрунтового покриві, поступлення їх в рослини кореневим та аеральним шляхом дозволило почати розробку комплексних моделей формування врожайності сільськогосподарських культур, які синтезують опис впливу як гідрометеорологічного режиму, так і антропогенного забруднення на формування кількості, якості та екологічної чистоти врожаю, у тому числі і в посушливій зоні.

В результаті викидів промислових підприємств в атмосферу різних забруднюючих речовин у вигляді важких металів та радіонуклідів відбувається антропогенне забруднення як атмосфери так і ґрунту. Крім того, перелічені вище забруднюючі елементи входять у склад мінеральних добавок які вносяться під сільськогосподарські культури, а також вода яка використовується з ціллю зрошення має низьку якість і вміщує у собі радіонукліди та важкі метали.

Для урахування комплексу цих факторів необхідно використовувати математичні моделі які з достатнім ступенем вірогідності можуть описувати вказані процеси.

При розробці моделі виходять з такої концепції:

- продуктивність рослин визначається розвитком рослин та інтенсивністю ростових процесів в різних умовах зовнішнього середовища;
- розвиток невід'ємний від процесів росту. Ріст та розвиток моделюються нерозривно в комплексі та в залежності від режиму факторів зовнішнього середовища, а особливо екстремальних, та біологічних властивостей рослин;
- моделюється кореневе та аеральне засвоєння поллютантів: радіонуклідів, тяжких металів, сірки, пестицидів;
- якість та екологічна чистота врожаю формуються під впливом ендегенних та екзогенних факторів на протязі всього періоду вегетативного та репродуктивного росту рослин.

Процес формування кількості, якості та екологічної чистоти врожаю розглядається як складна сукупність синтезу, розпаду та взаємоперетворення основних компонентів біомаси, накопичення рослиною забруднюючих речовин.

Під кількістю врожаю розуміється накопичення сухої біомаси господарсько-цінної частини врожаю – зерна, під якістю – вміст у зерні білка та крохмалю, під екологічною чистотою – вміст у зерні радіонуклідів та тяжких металів.

Модель складається з семи блоків: вихідної інформації, радіаційного та водно-теплого режимів рослинного покриву, мінерального живлення рослин, фотосинтезу, дихання, накопичення рослинами важких металів, росту та розвитку.

Блок вхідної інформації включає дані про середню декадну температуру повітря, довготривалість сонячного сяяння, дефіцит вологості ґрунту, суму опадів, площу листової поверхні рослин.

Блок радіаційного та водно-теплого режимів рослинного покриву включає до себе дані про найменшу вологоємність ґрунту, оптимальні суми температур для росту рослин.

Блок мінерального живлення включає оптимальні та фактичні норми внесення азотних, фосфорних та калійних добрив а також коефіцієнти перерахування на мінеральні та органічні добрива.

Блок фотосинтезу включає оптимальні суми температур для фотосинтезу окремих органів рослин, коефіцієнти інтенсивності фотосинтезу та початковий уклон світлової кривої фотосинтезу.

Блок дихання включає коефіцієнти витрат на дихання росту та підтримку структур.

Блок накопичення рослинами важких металів включає дані про поглинальну здібність кореню, початкову концентрацію рухомих форм важких металів у ґрунті та параметри кореневої системи рослин.

Блок росту та розвитку включає вплив факторів навколишнього середовища на швидкість накопичення рослинної маси та враховує вплив процесів забруднення на рослинну масу. Перейдемо до більш детального описування блоків моделі. Сонячна радіація є основним екологічним фактором, який визначає будь-який процес, який відбувається у природі.

Енергія сонця є первинним джерелом усіх біофізичних та фізіологічних процесів, які проходять у системі ґрунт-рослина-атмосфера.

Внаслідок проходження скрізь атмосферу та відбиваючись від підстильної поверхні сонячна радіація зазнає зміни. Частина сонячної радіації поглинається в атмосфері та перетворюється в інші види енергії, головним чином, в теплову. Частина її розсіюється в атмосфері молекулами газів, аерозолями та хмарами.

В рослинній масі накопичується такі види забруднюючих речовин як: радіонукліди A_f ($f \in {}^{90}\text{Sr}, {}^{137}\text{Cs}$), важкі метали H_q ($q \in \text{Cd}, \text{Cu}, \text{Hg}, \text{Pb}, \text{Zn}$), двоокис сірки SO_2 та пестициди D_h . Формування в рослині єдиного фонду вільних вуглеводів C_{cv} , азоту N_{cv} , радіонуклідів $A_{f_{cv}}$, важких металів $H_{q_{cv}}$.

Основна роль в формуванні врожаю сільськогосподарських культур належить фотосинтезу листя. Для розрахунку інтенсивності фотосинтезу посіву картоплі в розрахунковій декаді використовується формула:

$$\Phi_0^j = kbI_{\text{п.Ф}}^j / (k + bI_{\text{п.Ф}}^j), \quad (3.1)$$

де Φ_0 – інтенсивність фотосинтезу при оптимальних умовах тепло- та вологозабезпеченості та реальних умовах освітленості, $\text{мг CO}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$;

$k = 28$ інтенсивність фотосинтезу при світловій насиченості та нормальній концентрації CO_2 , $\text{мг CO}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$;

$b = 300$ – початкової уклон світлової кривої, $\text{мг CO}_2 \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$ (кал $\text{см}^{-2} \cdot \text{хв.}^{-1}$);

$I_{\text{п.Ф}}$ – ФАР, що поглинається посівом, $\text{кал см}^{-2} \cdot \text{хв.}^{-1}$;

j – номер розрахункової декади.

Як відомо, в основі теорії продукційного процесу сільськогосподарських культур становить вивчення та описання процесу фотосинтезу рослин, тобто утворення вуглеводів у фотосинтезуючих органах з води та двоокису вуглецю під дією ряду факторів, основним з яких є інтенсивність ФАР в рослинному покриві.

По мірі проникнення ФАР у глибини рослинного покриву проходить зниження її інтенсивності в залежності від цілого ряду різних параметрів: висоти рослинного покриву, кутової орієнтації листя, розподілу щільності рослинного покриву за вертикаллю, товщини та форми листя. Детальний опис процесу трансформації ФАР у посіві є складною математичною

задачею, яка потребує урахування особливостей поглинання, розсіювання та відображення радіації у посіві, а також зміни її спектрального складу.

Найбільш простим та розповсюдженим методом, який характеризує послаблення ФАР рослинним покривом є формула Будаговського, згідно з якою середня інтенсивність фотосинтетично активної радіації у посіві визначається розвиненістю листового апарату рослин, тобто відносною площею листової поверхні (листовим індексом).

ФАР, яка поглинається посівом, в розрахунковій декаді розраховується за формулою:

$$I_{п.Ф}^j = I_0^j / (1 + cL^j), \quad (3.2)$$

де I_0 – інтенсивність ФАР на верхній межі посіву в розрахунковій декаді, кал $см^{-2} \cdot хв^{-1}$;

$c = 0,5$ – емпірична постійна;

L – площа листової поверхні в розрахунковій декаді, $м^2 \cdot м^{-2}$. Потік ФАР на верхню межу посіву визначається за формулою:

$$I_0^j = 0,5Q^j / 60\tau_{Д}, \quad (3.3)$$

де Q – сумарна сонячна радіація, кал $см^{-2} \cdot доб^{-1}$;

$\tau_{Д}$ – середня тривалість дня в розрахунковій декаді, г.

Сумарна сонячна радіація розраховується за формулою Сивкова

$$Q^j = 12,66(S^j)^{1,31} + 315(\sinh \frac{j}{h_{п}})^{2,1}, \quad (3.4)$$

де S – середня тривалість сонячного сяяння в розрахунковій декаді, г;

$h_{п}$ – полуденна висота Сонця, яка визначається за формулою:

$$\sinh \dot{J}_{\Pi} = A^j + B^j, \quad (3.5)$$

де $A = \sin \varphi \sin \delta$;

$B = \cos \varphi \cos \delta$;

φ - географічна широта станції;

δ - схил Сонця.

Таблиця схилень Сонця для весняних та літніх місяців апроксимована поліномом:

$$\delta = [0.47 \cdot t_0 - 0.196 \cdot 10^{-2} \cdot t_0^2 - 0.407 \cdot 10^{-5} \cdot t_0^3 - 0.616] \cdot 0.017453, \quad (3.6)$$

де t_0 – кількість днів від 20 березня до дня появи сходів;

Інтенсивність фотосинтезу в реальних умовах середовища, які відрізняються від біологічно оптимальних, визначається за формулою:

$$\Phi_{\tau}^j = \Phi_0^j \alpha_{\Phi}^j \psi_{\Phi}^j \gamma_{\Phi}^j, \quad (3.7)$$

де Φ_{τ} – інтенсивність фотосинтезу в реальних умовах середовища, $\text{мг CO}_2 \text{ дм}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$;

$\alpha_{\Phi} = 0.75$ – онтогенетична крива фотосинтезу;

$\gamma_{\Phi} = 0.8$ – функція впливу вологості ґрунту на фотосинтез;

ψ_{Φ} - функція впливу температури повітря на фотосинтез знаходиться як:

$$\psi_{\Phi} = \text{EXP}^{-1.68[(t-22)/10]^2} \quad (3.8).$$

де t – температура повітря у розрахунковій декаді.

Сумарний фотосинтез посіву за світлий час доби розраховується за формулою:

$$\Phi^j = 0.1 \varepsilon^j L^j \tau_{\text{Д}}^j \Phi_{\tau}, \quad (3.9)$$

де Φ – денний фотосинтез рослин на одиницю площі, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{доб}^{-1}$;

$\varepsilon = 0,68$ – коефіцієнт ефективності фотосинтезу;

L – площа листової поверхні, $\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$;

τ_d – середня тривалість дня у розрахунковій декаді, г.

Добовий приріст сухої біомаси посіву в розрахунковій декаді ΔM ($\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{доб}^{-1}$)

визначається сумою денного фотосинтезу посіву та переміщення сухих речовин:

$$\Delta M^j = (\Phi^j + \Delta m_c^j) - \alpha_R^j (c_1 M^j + c_2 \Phi^j), \quad (3.10)$$

де $\alpha_R = 0,5$ – онтогенетична крива дихання, яка розраховується аналогічно до кривої фотосинтезу, тільки з урахуванням оптимальної температури $t_{1 \text{ opt}}$ для сезонного ходу дихання;

M – суха біомаса посіву на початок розрахункової декади, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$

$c_1 = 0,01$ – коефіцієнт, який характеризує витрати на підтримку структури, $\text{г} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{доб}^{-1}$;

$c_2 = 0,255$ – коефіцієнт дихання росту, безрозмірний.

Контрольні запитання

1. Що представляє собою пряма, розсіяна та сумарна радіація?
2. Що таке ФАР, її роль у житті рослин?
3. Які ще види радіації Ви знаєте?
4. Як розраховується радіація за даними спостережень за довготривалістю сонячного сяйва?
5. Яким ще чином можна розрахувати сонячну радіацію?
6. Як розраховується ФАР на верхній межі посіву?
7. Чим обумовлено послаблення ФАР у рослинному покриві?
8. Як розрахувати ФАР у посіві?

Завдання для самостійної роботи

1. Розрахувати схил сонця ;
2. Розрахувати сумарну сонячну радіацію за формулою Сивкова за кожен декаду вегетації;

3. Розрахувати інтенсивність фотосинтетично активної радіації на верхній межі сівби;

4. Розрахувати інтенсивність фотосинтезу за оптимальних умов тепло- та вологозабезпеченості і в реальних умовах освітленості.

5. Розрахувати інтенсивність фотосинтезу в реальних умовах навколишнього середовища, враховуючи вплив температури повітря та вологості ґрунту на фотосинтез

6. Розрахувати сумарний фотосинтез посіву за світлий час доби.

7. Розрахувати добовий приріст сухої біомаси посіву в розрахунковій декаді (початкові дані для розрахунків дивитись у табл.1). Завдання виконуються за варіантами 1 – 12.

Після виконання розрахунків студенти повинні відповісти на питання, що характеризують базові знання.

Перелік посилань

1. Бихеле З.Н., Молдау Х.А., Росс Ю.К. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 223 с.

1. Харченко С.И. Гидрология орошаемых земель. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 223 с.

2. Най П.Х., Тинкер П.Б. Движение растворов в системе "почва – растение". М.: Колос, 1980. – 365 с.

3. Кормилицын В.И. и др. Основы экологии / В.И. Кормилицын, М.С. Цицкишвили, Ю.И. Яломов. – М.: Интерстиль, 1997.

4. Куценко А.М. Писаренко В.Н. Охрана окружающей среды в сельском хозяйстве. – Киев: Урожай, 1991.

Таблиця 3.1 – Вхідні дані для розрахунку основних процесів формування кількості врожаю культур

Варіант 1

Херсонська область ст. Херсон

Показники	квітень			травень			червень			липень	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
t, °C	6.0	7.2	12.1	14.4	12.3	14.9	16.6	18.1	21.2	20.2	22.1
SS, год	7	7	7	8	8	8	9	9	10	10	11
d, мб	1	3	4	5	5	6	5	7	11	9	14
Σ r, мм	43	7	23	1	3	15	18	13	30	1	0
L, від/од	0.04	0.19	0.43	0.61	0.78	0.92	1.0	1.15	1.26	1.38	1.5
τ _д , год	14.8	15.6	16.0	16.4	16.3	16.1	16.0	15.5	15.0	14.6	13.8
M _r , кг/м ²	0.009	0.17	0.24	0.38	0.42	0.64	0.78	0.86	0.93	0.97	0.8
a _r , м	0.001	0.005	0.006	0.009	0.01	0.02	0.06	0.08	0.08	0.07	0.0
$\alpha_{\text{погл.}} - 0.005 \text{ м/с}, A_{Zn} - 5.0 \text{ мг/кг}; \Delta m_c^j = 0,3$											

Варіант 2

Херсонська область ст. Асканія Нова

Показники	квітень			травень			червень			липень	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
t, °C	5.9	7.3	12.2	13.8	12.1	14.7	16.6	17.6	21.8	20.7	23.1
SS, год	6	6	6	6	7	7	8	9	9	10	10
d, мб	1	3	4	5	5	6	5	7	11	9	14
Σ r, мм	23	4	19	11	3	20	16	2	2	0	0
L, від/од.	0.04	0.19	0.43	0.61	0.78	0.92	1.0	1.15	1.26	1.38	1.5
τ _д , год	14.8	15.6	16.0	16.4	16.3	16.1	16.0	15.5	15.0	14.6	13.8
M _r , кг/м ²	0.01	0.09	0.19	0.28	0.37	0.56	0.69	0.79	0.93	1.17	1.2
a _r , м	0.001	0.002	0.004	0.006	0.008	0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.0
$\alpha_{\text{погл.}} - 0.008 \text{ м/с}, A_{Zn} - 6.2 \text{ мг/кг}; \Delta m_c^j = 0,3$											

Варіант 3

Одеська область ст. Любашовка

Показники	квітень			травень			червень			липень	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
t, °C	4.5	6.6	11.3	13.7	10.7	13.1	15.0	16.7	19.5	17.9	19.4
SS, год	7	7	7	8	8	8	9	9	9	10	10
d, мб	2	4	4	5	5	6	4	5	9	6	8
Σ r, мм	23	8	20	4	6	45	33	34	20	26	20
L, від/од.	0.06	0.24	0.36	0.78	0.89	1.06	1.34	1.57	1.69	1.73	1.99
τ _д , год	2.4	4.2	6.0	5.9	6.3	6.2	6.0	5.9	5.5	5.0	4.6
m _r , кг/м ²	0.01	0.08	0.12	0.36	0.47	0.52	0.63	0.69	0.72	0.86	0.80
a _r , м	0.002	0.004	0.006	0.008	0.009	0.01	0.03	0.05	0.07	0.09	0.1
$\alpha_{\text{погл.}} - 0.008 \text{ м/с}, A_{Zn} - 8.9 \text{ мг/кг}; \Delta m_c^j = 0,2$											

Варіант 4

Одеська область ст. Сарата

Показники	квітень			травень			червень			липень	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
t, °C	6.4	8.9	11.8	14.2	12.4	14.0	16.7	18.5	20.8	20.0	21.9
SS, год	7	7	7	8	8	9	9	10	10	10	11
d, мб	2	4	5	4	5	4	5	7	8	8	10
Σr , мм	40	4	12	7	3	43	42	61	38	15	7
L, від/од.	0.06	0.24	0.36	0.78	0.89	1.06	1.34	1.57	1.69	1.73	1.99
τ_d , час	2.4	4.2	5.0	5.9	6.3	6.2	6.0	5.9	5.5	5.0	4.6
m r, кг/м ²	0.006	0.17	0.30	0.42	0.59	0.67	0.79	0.93	1.05	1.19	1.26
a _r , м	0.001	0.002	0.003	0.005	0.007	0.009	0.01	0.03	0.05	0.06	0.07
$\alpha_{\text{погл.}} = 0.007$ м/с, $A_{Zn} = 4.9$ мг/кг; $\Delta m_c^j = 0,2$											

Варіант 5

Миколаївська область ст. Бехтери

Показники	квітень			травень			червень			липень	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
t, °C	6.5	7.5	11.5	14.1	12.5	14.8	16.0	18.4	21.1	20.3	23.0
SS, год	7	7	7	8	8	8	9	9	9	9	10
D, мб	1	3	4	5	5	5	3	7	8	8	12
Σr , мм	32	4	6	2	7	22	22	6	28	2	0
L, від/од.	0.04	0.19	0.43	0.61	0.78	0.92	1.0	1.15	1.26	1.38	1.59
τ_d , год	14.8	15.6	16.0	16.4	16.3	16.1	16.0	15.5	15.0	14.6	13.9
m r, кг/м ²	0.03	0.17	0.28	0.37	0.49	0.58	0.64	0.78	0.93	0.99	1.09
a _r , м	0.002	0.003	0.004	0.005	0.01	0.03	0.05	0.06	0.07	0.09	0.1
$\alpha_{\text{погл.}} = 0.008$ м/с, $A_{Zn} = 4.7$ мг/кг; $\Delta m_c^j = 0,4$											

Варіант 6

Миколаївська область ст. Березанка

Показники	квітень			травень			червень			липень	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
t, °C	5.4	6.8	11.4	13.9	11.9	14.1	16.2	17.9	20.3	19.3	21.5
SS, год	7	7	7	8	8	9	9	10	10	10	11
d, мб	1	3	4	5	6	5	5	7	9	7	11
Σr , мм	32	2	22	6	3	19	8	8	48	7	3
L, від/од.	0.07	0.31	0.59	0.78	0.90	1.20	1.46	1.77	1.92	2.04	2.07
τ_q , год	15.2	15.6	15.9	16.2	16.5	16.4	16.3	16.1	15.6	15.1	14.6
m r, кг/м ²	0.01	0.09	0.19	0.27	0.38	0.40	0.52	0.60	0.69	0.74	0.86
a _r , м	0.001	0.002	0.003	0.005	0.007	0.01	0.03	0.06	0.08	0.1	0.12
$\alpha_{\text{погл.}} = 0.006$ м/с, $A_{Zn} = 9.3$ мг/кг; $\Delta m_c^j = 0,4$											

Варіант 7 Херсонська область ст. Нижні Сероводи

Показники	квітень			травень			червень			липень	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
t, °C	5.6	6.7	12.7	14.0	12.3	14.9	16.5	17.3	21.7	20.7	23.9
SS, год	7	7	7	8	8	8	9	9	10	10	11
d, мб	1	4	5	5	5	6	4	6	13	12	17
Σ r, мм	24	4	16	1	1	13	26	20	0	0	0
L, від/од.	0.04	0.19	0.43	0.61	0.78	0.92	1.0	1.15	1.26	1.38	1.59
τ _д , год	14.8	15.6	16.0	16.4	16.3	16.1	16.0	15.5	15.0	14.6	13.9
m r, кг/м ²	0.07	0.19	0.24	0.38	0.50	0.72	0.86	0.96	1.05	1.19	1.36
a _r , м	0.001	0.003	0.005	0.01	0.03	0.07	0.08	0.09	0.1	0.11	0.1
$\alpha_{\text{погл.}} = 0.007$ м/с, $A_{Zn} = 3.6$ мг/кг; $\Delta m_c^j = 0,3$											

Варіант 8 Херсонська область ст. Велика Олександрівка

Показники	квітень			травень			червень			липень	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
t, °C	5.6	6.5	12.5	15.0	12.3	14.8	16.2	18.0	20.9	19.8	21.9
SS, год	6	6	6	7	7	7	8	8	9	10	10
d, мб	2	4	5	7	5	7	4	7	11	9	12
Σ r, мм	34	8	15	21	11	14	96	4	68	0	0
L, від/од.	0.04	0.19	0.43	0.61	0.78	0.92	1.0	1.15	1.26	1.38	1.59
τ _д , год	14.8	15.6	16.0	16.4	16.3	16.1	16.0	15.5	15.0	14.6	13.9
m r, кг/м ²	0.001	0.06	0.24	0.38	0.47	0.63	0.78	0.90	0.99	1.06	1.17
a _r , м	0.001	0.002	0.003	0.005	0.006	0.008	0.009	0.01	0.03	0.05	0.07
$\alpha_{\text{погл.}} = 0.006$ м/с, $A_{Zn} = 6.2$ мг/кг; $\Delta m_c^j = 0,3$											

Варіант 9 Херсонська область ст. Попелюк

Показники	квітень			травень			червень			липень	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
t, °C	5.7	7.0	13.1	13.9	12.5	14.9	16.7	17.2	21.7	20.7	23.9
SS, год	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	10
d, мб	1	3	5	5	5	6	4	5	12	11	17
Σ r, мм	22	6	20	4	2	9	48	17	0	1	0
L, від/од.	0.04	0.19	0.43	0.61	0.78	0.92	1.0	1.15	1.26	1.38	1.59
τ _д , год	14.8	15.6	16.0	16.4	16.3	16.1	16.0	15.5	15.0	14.6	13.9
m r, кг/м ²	0.003	0.09	0.15	0.20	0.24	0.38	0.46	0.52	0.63	0.75	0.60
a _r , м	0.001	0.002	0.003	0.006	0.008	0.009	0.01	0.02	0.05	0.06	0.07

$\alpha_{\text{погл.}} - 0.005 \text{ м/с}, A_{Zn} - 5.8 \text{ мг/кг}; \Delta m_c^j = 0,3$

Варіант 10 Одеська область ст. Роздільна

Пок азники	квітень			травень			червень			липень	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
t, °C	5.1	8.0	11.5	13.8	11.7	13.5	15.7	17.5	20.0	19.0	20.6
SS, год	7	7	7	8	8	8	9	9	9	10	10
d, мб	2	4	5	5	5	5	5	6	8	7	9
Σr , мм	38	10	28	17	13	37	38	40	35	33	14
L, від/од.	0.06	0.24	0.36	0.78	0.89	1.06	1.34	1.57	1.69	1.73	1.99
τ_d , год	12.4	14.2	16.0	15.9	16.3	16.2	16.0	15.9	15.5	15.0	14.6
m r, кг/м ²	0.01	0.08	0.12	0.36	0.47	0.52	0.63	0.69	0.72	0.86	0.80
a _r , м	0.002	0.004	0.006	0.008	0.009	0.01	0.03	0.05	0.07	0.09	0.1

$\alpha_{\text{погл.}} - 0.008 \text{ м/с}, A_{Zn} - 8.9 \text{ мг/кг}; \Delta m_c^j = 0,2$

Варіант 11 Миколаївська область ст. Очаков

Пок азники	квітень			травень			червень			липень	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
t, °C	5.6	6.9	11.0	13.5	12.2	14.4	16.3	18.6	20.6	19.8	21.8
SS, год	6	7	7	8	8	9	9	9	10	10	11
d, мб	1	3	3	4	5	5	4	7	7	6	10
Σr , мм	30	2	17	10	13	11	8	11	81	19	2
L, від/од.	0.07	0.31	0.59	0.78	0.90	1.20	1.46	1.77	1.92	2.04	2.07
τ_d , год	15.2	15.6	15.9	16.2	16.5	16.4	16.3	16.1	15.6	15.1	14.6
m r, кг/м ²	0.005	0.09	0.24	0.38	0.46	0.64	0.89	0.93	0.97	0.99	0.86
a _r , м	0.003	0.005	0.006	0.008	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09

$\alpha_{\text{погл.}} - 0.003 \text{ м/с}, A_{Zn} - 6.9 \text{ мг/кг}; \Delta m_c^j = 0,4$

Варіант 12 Одеська область ст. Ізмаїл

Показники	квітень			травень			червень			липень	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
t, °C	16.6	10.0	2.2	15.1	12.6	14.9	16.7	19.1	21.1	20.3	22.5
SS, год	7	7	7	8	8	9	9	10	10	10	11
d, мб	2	5	6	6	4	4	4	7	10	8	10
Σr , мм	37	8	9	3	15	48	22	22	40	22	5
L, від/од.	0.06	0.24	0.36	0.78	0.89	1.06	1.34	1.57	1.69	1.73	1.99
τ_d , год	12.4	14.2	15.0	15.9	16.3	16.2	16.0	15.9	15.5	15.0	14.6
m r, кг/м ²	0.006	0.01	0.19	0.24	0.42	0.59	0.78	0.96	1.08	1.29	1.36
a _r , м	0.002	0.003	0.004	0.006	0.008	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06

$$\alpha_{\text{погл.}} - 0.006 \text{ м/с}, A_{\text{Zn}} - 5.8 \text{ мг/кг}; \Delta m_c^j = 0,2$$

3.2 Розрахунок ступеню забруднення ґрунту та рослин в результаті використання режиму зрошення

Територія України відноситься до територій з недостатнім або нестійким режимом зволоження ґрунту. Тому виробництво сільськогосподарської продукції вимагає застосування зрошення для отримання достатньої кількості, якості та екологічної чистоти врожаїв. Але зрошення в деяких випадках веде до осолонцювання та засолення ґрунту. Тому з екологічної точки зору дуже важливо ураховувати забруднення ґрунту внаслідок зрошування.

Засолення ґрунту, як відомо, уявляє собою збільшення утримання у ньому легкорозчинних солей (карбонату натрію, хлоридів, сульфатів). Якщо процес засолення обумовлений засоленістю ґрунтоутворюючих порід, приносом солей ґрунтовими та поверхневими водами, тоді засолення називають первинним або вторинним.

Процес осолонцювання уявляє собою утворення солодій з солонців шляхом деградації останніх в результаті заміщення обмінного Na^+ на H^+ . Воно обумовлено натрієво-кальцієвим потенціалом зрошувальної води.

Процес засолення ґрунту обумовлений кількістю мінеральних солей, які знаходяться у зрошувальній воді, тобто значенням її мінералізації.

Вплив осолонцювання ґрунту на формування врожаю сільськогосподарських культур враховується за допомогою функцій впливу рівню натрієво-кальцієвого потенціалу ґрунту на приріст рослинної маси:

$$K_{\text{Na-Ca}}^j = [1 - (0.31P_{\text{Na-Ca}} - 0.4)] \mu^j \text{TSL}^j n^j \quad (3.11)$$

де $K_{\text{Na-Ca}}^j$ – функція впливу натрієво-кальцієвого потенціалу ґрунту на приріст сухої біомаси цілої рослини, безрозмірна;

ґрунту(j)

$P_{\text{Na-Ca}}$ – натрієво-кальцієвий потенціал ґрунту, безрозмірний;

$\mu = 0,5$ – потенціальна інтенсивність росту рослин, безрозмірна;

TSL – середня за декаду ефективна температура, $^{\circ}\text{C}$

n – кількість днів у розрахунковій декаді.

Приймається, що величина натрієво-кальцієво потенціалу ґрунту не змінюється до поливу:

$$\text{ґрун } (j + 1) \quad \text{ґрун } (j)$$

$$P_{\text{Na-Ca}} = P_{\text{Na-Ca}} \text{ при } X^j = 0 \quad (3.12)$$

В декаду вегетаційного поливу ця характеристика визначається нами в залежності від рівня натрієво-кальцієвого потенціалу зрошуваної води та внесення фосфогіпсу

$$P_{\text{Na-Ca}} = (1,25 P_{\text{Na-Ca}}^{\text{зр.в.}(j)} - 0,125) K_{\text{Na-Ca}}(G_H) K_{\text{Na-Ca}}(G_{\text{ч}}) \quad (3.13)$$

де зр.в.(j)

$P_{\text{Na-Ca}}$ – натрієво-кальцієвий потенціал зрошувальних вод, безрозмірний;

$K_{\text{Na-Ca}}(G_H)$ та $K_{\text{Na-Ca}}(G_{\text{ч}})$ – відповідно, функції впливу внесення кількості (норм) фосфогіпсу та часу внесення фосфогіпсу (прямодія та наслідок), які визначаються як:

$$K_{\text{Na-Ca}}(G_H) = 0,060 G_H + 1,0, \text{ при } \leq G_H 8 \text{ т.га}^{-1} \quad (3.14)$$

$$1,3 \text{ при } G_H > 8 \text{ т.га}^{-1}, \quad (3.15)$$

$$K_{\text{Na-Ca}}(G_{\text{ч}}) = 1,0, \text{ при } G_{\text{ч}} = 2 \text{ роки} \quad (3.16)$$

$$1,25 - 0,1 G_{\text{ч}}, \text{ при } G_{\text{ч}} \geq 2 \text{ роки} \quad (3.17)$$

де G_H – норма внесення фосфогіпсу, т/га;

$G_{\text{ч}}$ – порядковий номер року після внесення фосфогіпсу.

Зниження продуктивності рослин під впливом засолювання ґрунту розраховується за допомогою функції впливу міри засолювання ґрунту на приріст біомаси рослин

$$K_s = 1 - q_s (S_{\text{ґрунту}} - S_{\text{ґрунту}}^{\text{кр}}) \mu \text{TSL} n \quad (3.18)$$

де K_s^j - функція впливу утримання солей у ґрунті на приріст біомаси рослин, безрозмірна;

$q_s = 0,3$ - зниження приросту біомаси на одиничний приріст засолення, безрозмірний;

$S_{\text{грунту}}$ - вміст солей у водній витяжці ґрунту, гр /л;

$S_{\text{грунту}}^{\text{кр}}$ - критичний рівень засолення, гл⁻¹.

У першому приближенні приймається, що утримання солей у водній витяжці ґрунту до першого вегетаційного поливу зберігається на одному рівні:

$$S_{\text{грун}}^{j+1} = S_{\text{грун}}^j, \quad \text{при } X = 0 \quad (3.19)$$

Для розрахунку рівня засолення ґрунту в декаду вегетаційного поливу скористуємось рівнянням, апроксимуючи приведену в графічному вигляді залежність лінійним рівнянням, для цього введемо функції впливу внесення фосфогіпсу на засолення ґрунту:

$$S_{\text{грун}} = (0,086S_{\text{зр.в.}} + 0,092) K_S \cdot (G_H) \cdot K \cdot (G_{\text{ч}}) \quad (3.20)$$

де $S_{\text{зр.в.}}$ – мінералізація зрошувальної води, гл⁻¹;

$K_S(G_H)$ та $K(G_{\text{ч}})$ – відповідно функції впливу внесення кількості фосфогіпсу та часу його внесення;

$$K_S(G_H) = 0,444G_H + 0,7, \quad \text{при } G_H \leq 9 \text{ т./га} \quad (3.21)$$

$$3,0, \quad \text{при } G_H > 9 \text{ т./га} \quad (3.22)$$

$$K(G_{\text{ч}}) = 1,0, \quad \text{при } G_{\text{ч}} \leq 2 \text{ роки} \quad (3.23)$$

$$K(G_{\text{ч}}) = 1,2 - 0,45 G_{\text{ч}}, \quad \text{при } G_{\text{ч}} > 2 \text{ роки} \quad (3.24)$$

Накопичення важких металів рослиною розглядається в залежності від утримання рухомих форм важких металів у ґрунті. Швидкість надходження важких металів у рослину описується формулою:

$$\frac{\Delta A_q^{\text{погл(о)}}}{\Delta t} = \frac{86.4 \alpha_q \bar{A}_q m_r}{a_r} \quad (3.25)$$

де $\frac{\Delta A_q^{\text{погл}}}{\Delta t}$ – швидкість поглинання рухомих форм q-го важкого металу корінням рослини, мгм⁻²доб⁻¹;

$\alpha_q^{\text{погл}}$ – поглинальна здібність кореню, мс^{-1} ;

$\bar{A}_q^{\text{грунт}}$ – концентрація рухомих форм q -го важкого металу у ґрунті, мгкг^{-1} ;

a_r – радіус кореню., см ;

q – вид важкого металу.

У зв'язку з можливим підвищенням рівню антропогенного забруднення ґрунту та рослин важкими металами врахуємо їх фітотоксичний вплив за допомогою коефіцієнту фітотоксичності $K_{\text{ВМ}}$, визначеного за принципом Лібіха з великої кількості коефіцієнтів фітотоксичності кожного виду важких металів

$$K_{\text{м.М}}^j = \min \left\{ K_q^j \right\} q \in \text{Cd, Cu, Hg, Pb, Sr, Zn} \quad (3.26)$$

кожний з яких визначається з виразу:

$$K_q^{\text{кр}j} = 1 - \left(\frac{\mu A_q}{A_q^{\text{кр}2} - A_q^{\text{кр}1}} \right) \cdot A_q^{\text{рос}(j)} \quad (3.27)$$

де μA_q - зниження продуктивності рослин в інтервалі критичних величин концентрації важких металів у рослині $A_q^{\text{лз}1}$ и $A_q^{\text{лз}2}$ (мг кг^{-1}).

Контрольні запитання

Чому необхідно використовувати режим зрошення стосовно умов України?

Які негативні наслідки використання зрошення під сільськогосподарські культури?

Що називається осолонцюванням ґрунту, чим воно обумовлено?

Що називається процесом засолення ґрунту, якими факторами воно обумовлено?

Як розраховується функція впливу осолонцювання на екологічну чистоту ґрунту?

Що називається натрієво-кальцієвим потенціалом ґрунту?

За якою формулою розраховується функція впливу засолення ґрунту на його екологічну чистоту?

Що називається мінералізацією?

Які види металів відносять до важких, чому?

10. Які ви знаєте джерела постачання важких металів у ґрунт?

11. Як розраховується швидкість надходження важких металів у рослини з ґрунту?

Завдання для самостійної роботи

1. Визначається натрієво-кальцієвий потенціал зрошувальної води за формулою (3.13).

2. Розраховується функція впливу натрієво-кальцієвого потенціалу ґрунту на приріст сухої біомаси рослини за формулою (3.11).

3. Визначається рівень засолення ґрунту в декаду вегетаційного поливу за формулою (3.20).

4. Розраховується функція впливу утримання солей в ґрунті на приріст біомаси рослин (3.18).

5. Зниження продуктивності рослин в інтервалі критичних величин ураховується за допомогою формули (3.27).

6. Швидкість поглинання важких металів рослинами розраховується за формулою (3.25).

За таблицею 3.2 розраховується рівень забруднення врожайності цукрового буряку різними видами важких металів

Таблиця 3.2 – Характеристики для розрахунку рівня забруднення врожайності цукрового буряку різними видами важких металів

Види важких металів	Поглиняльна здібність коріння, м/с ²	Концентрація у ґрунті, мг/кг	Радіус кореня
Азот N	0,0038	82,0	0,025
Мідь Cu	0,000028	0,74	0,0105
Цинк Zn	0,000025	3,30	0,01
Кадмій Cd	0,00003	0,13	0,023
Стронцій Sr	0,000003	16,9	0,023
Свинець Pb	0,000005	1,38	0,025
Ртуть Hg	0,00011	0,0037	0,025

За таблицею 3.3 розраховується вплив осолонцювання та засолення ґрунту на кількість та якість врожаїв сільськогосподарських культур. Завдання виконуються за варіантами.

Таблиця 3.3 – Вплив осолонцювання та засолення ґрунту на кількість та якість врожаїв сільськогосподарських культур

Варіант культура	Норма зрошення, м ³ /га	P _{Na-Ca} грун- ту	P _{Na-Ca} зрошу- вальної води	G _H	G _R	S Грун- ту	S зрошува льної води
I озима пшениця	500	1,3	1,0	3,0	3,0	1,5	1,0
	1000			3,2			0,8
	1500			3,4			0,6
II куку- рудза	1000	1,5	0,9	3,6	2,0	1,2	1,2
	2000			3,8			1,0
	3000			4,0			0,8
III Цукрови й буряк	1000	1,5	1,0	3,2	4,0	1,3	1,2
	2000			3,3			1,4
	3000			3,4			1,5
IV люцерна	800	1,2	0,8	2,8	3,0	1,6	0,8
	1200			2,9			0,7
	1600			3,1			0,8
V горох	500	1,0	1,0	2,6	2,0	1,3	0,6
	1000			2,7			0,7
	150			2,8			0,8
VI соняш- ник	800	1,0	0,9	3,0	2,0	1,2	1,0
	1400			3,5			1,2
	2000			4,0			0,8
VII Гречка	800	1,3	0,9	3,2	2,2	1,4	1,1
	1200			3,6			1,3
	1600			4,0			1,8
VIII Картопля	800	1,2	1,0	3,3	2,3	1,5	1,0
	1400			3,5			1,3
	2000			3,8			1,4
IX Капуста	1000	1,4	1,1	3,0	2,0	1,7	1,0
	1500			3,5			1,2
	2000			4,0			1,6
X Огірки	800	1,0	0,9	3,0	2,1	1,3	1,0
	1400			3,5			1,5
	2000			4,0			1,8

Перелік посилань

1. Лозановская И.Н. и др. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении / И.Н. Лозановская, Д.С. Орлов, Л.К. Садовникова. – М.: Высшая школа, 1998.
2. Минеев В.Г. Экологические проблемы агрохимии. – М.: Изд-во МГУ, 1988.
3. Минеев В.Г. Химизация земледелия и природная среда. – М.: Агропромиздат, 1990.
4. Тяжелые металлы в системе «почва – растение – удобрение» / М.М. Овчаренко, И.А. Шильников, Г.Г. Вендили и др.; Под ред. М.М. Овчаренко. – М.: Пролетарский светоч, 1977.
5. Экология и земледелие / Под ред. Е.Н. Мишустина. – М.: Наука, 1980.
6. Полевой А.Н. Моделирование процесса формирования продуктивности зерновых культур в условиях радиоактивного загрязнения агроэкосистем. – Метеорология и гидрология, 1983, п.12, с.97-105.

3.3 Розрахунок міграції радіонуклідів у системі ґрунт – рослина

Вирощування сільськогосподарських культур в умовах зрошення приводить до виникнення проблеми радіонуклідного забруднення ґрунту та рослин. В результаті недоліку водопостачання на поля, з метою зрошення для економії часто застосовується повторне використання скинених вод. У теперішній час зрошувальна норма в середньому складає 4-7 тис.м³/га при середньому значенні 5,2 тис.м³/га, до того ж 30% води використовується повторно.

Максимальна концентрація радіонуклідів у воді відзначається на початку зрошувального сезону, а у його середині вона зменшується у 10 разів та більше, зростаючи наприкінці поливу

Динаміку утримання радіонуклідів у зрошувальній воді можна описати рівнянням:

$$\alpha_{it} = \alpha_{i0} \exp(-a_i t + b_i t^2) \quad (3.28)$$

де α_{i0} та α_{it} – відносне утримання i -го радіонукліда у воді відповідно у початковий момент та наприкінці часу t (доб), (Бк/м²);

a_i та b_i – постійні, які характеризують поведінку i -го радіонукліда у системі ґрунт - розчин.

Значення, які входять до формули для різних радіонуклідів, подані у табл. 3.4.

За фізичним змістом α_{i0} відображає здібність радіонуклідів у початковий момент переходити з ґрунту у воду та визначається рухливістю радіонуклідів у системі ґрунт - розчин. Параметри a_i та b_i також є показниками рухливості радіонуклідів у системі ґрунт – розчин: a_i характеризує здібність радіонукліда мігрувати у глибину ґрунту та ступінь закріплення у ньому, що обумовлює зниження його вмісту у воді, а b_i відображує здібність до десорбції радіонукліда з ґрунту у воду, внаслідок чого його утримання у воді може зростати.

Викладене раніше рівняння ілюструє швидкість зміни утримання радіонукліда у воді:

$$V_{\alpha} = \frac{d\alpha_t}{dt} = a\alpha_t + 2b\alpha_t t \quad (3.29)$$

Таблиця 3.4 – Значення параметрів a_{i0}, a_i, b_i, m_i та x для різних радіонуклідів

Радіону-клід	$a_{i0}, 10^{-4}$ (Бк/л) (Бк/м ²)	$a_i,$ сут ⁻¹	$b_i, 10^{-4}$ сут ⁻²	m_i , см	C_{i0}
²² Na	50	0,15	13,9	10,6±1,3	35,2
⁴⁵ Ca	8,6	0,11	9,0	1,5±0,2	5,0
⁵⁴ Mn	2,6	0,11	10,7	0,57±0,06	1,9
⁵⁹ Fe	0,39	0,03	1,6	0,54	-
⁶⁰ Co	0,84	0,10	9,7	0,74	-
⁶⁵ Zn	0,62	0,07	7,5	0,85	-
⁹⁰ Sr	5,0	0,11	9,4	1,3±0,2	4,3
¹⁰⁶ Ru	0,65	0,11	9,2	0,54±0,08	1,8
¹²⁵ Sb	0,23	-0,015	-9,1	0,48±0,12	1,6
¹³⁷ Cs	0,19	0,066	8,2	0,44±0,28	1,5

З формули (3.29) видно, що зниження концентрації радіонуклідів у воді визначається безпосередньо величиною a та не залежить від часу. Збільшення концентрації радіонуклідів у воді визначається величиною b , воно пропорційно часу t .

Порівнюючи значення a та b , які відображують протилежні процеси, можна визначити, що перший процес (сорбція радіонуклідів) йде більш інтенсивно, ніж другий (їх десорбція).

Описуючи динаміку утримання радіонуклідів у воді, треба мати на увазі, що α - величина відносна і тому не ураховує фізичний розпад, який є важливим фактором, що приводить до зниження їх концентрації у воді.

При дослідженні міграції радіонуклідів за ґрунтовими горизонтами виявлено, що наприкінці вегетаційного періоду встановлюється експоненціальний розподіл їх по глибині, тобто виконується відношення:

$$C_{ix} = C_{io} \exp(-0,693 x/m_i) \quad (3.30)$$

C_{ix} та C_{io} – утримання i -го радіонукліда на поверхні ґрунту та на глибині x (см) відповідно, Бк/кг;

m_i – індивідуальна характеристика радіонукліда, яка відповідає глибині, на якій його утримання в ґрунті зменшується у 2 рази.

Контрольні запитання

1. Чому необхідно ураховувати утримання радіонуклідів у ґрунті при використанні режиму зрошення?
2. Коли відзначається максимальна концентрація радіонуклідів у воді.
3. За якою формулою розраховується відносне утримання радіонукліда.
4. Який фізичний зміст має величина α_0 ?
5. Що характеризують постійні a та b ?
6. Як розраховується швидкість зміни утримання радіонукліда у воді?
7. Який з вказаних процесів (сорбція, десорбція) йде більш інтенсивно і чому?
8. Що приводить до зниження концентрації радіонуклідів у воді?
9. Як можна ураховувати утримання радіонуклідів на різній глибині та від чого це залежить.

Завдання для самостійної роботи

1. Визначається відносне утримання радіонукліда наприкінці часу зрошення за формулою (3.28).
2. Розраховується швидкість зміни утримання радіонукліда у воді за формулою (3.30).

3.Визначається утримання радіонукліда на глибині 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80- 90, 90-100 см.

Дані для розрахунку представлені у таблиці 3.4. Після виконання завдання студенти повинні відповісти на контрольні запитання.

Перелік посилань

1. Буфатин О.И., Парашуков Н.Б., Фомкина Н.Д., Алексахин Р.М. Распределение некоторых радионуклидов в системе почва-оросительная вода (модельный опыт) – Почвоведение, 1983, № 8, с. 133-136.
2. Маликов В.Г., Перепелятников Г.П., Алексахин Р.Т. О связи гидрохимических классов природной оросительной воды с накоплением ^{89}Sr в урожае озимой пшеницы при орошении дождеванием. – Докл. ВАСХНИЛ, 1981, № 7, с. 25-26.

3.4 Оцінка радіологічної ситуації на територіях, які зрошуються водами, які утримують штучні радіонукліди

Кількість радіоактивних відходів та їх радіонуклідний склад можуть бути різними для різних типів реакторів АЕС. Концентрація радіонуклідів у зрошувальній воді, яка була використовувана, буде залежати від об'єму водосховища, кількості води, яка береться для зрошення, сорбційні властивості донних відкладень та інших факторів.

В даній роботі описується радіаційна обстановка, яка пов'язана з використанням у зрошувальній меліорації вод, які утримують штучні радіонукліди. Вона виконується на прикладі АЕС, розташованої у зоні недостатнього зволоження з використанням даних про міграцію радіонуклідів.

Маючи дані про постачання радіонуклідів на зрошувальні площі можливо оцінити річне постачання радіонуклідів у організм людини:

$$Q = \sum (q_1 K\Pi_1 + q_2 K\Pi_2) K_3 m_i \quad (3.31)$$

де Q – постачання радіонукліда в організм людини, Бк/рік;

q_1 – постачання радіонукліда на угіддя, де вирощується сільськогосподарська культура, внаслідок дощування, Бк/м²рік);

$K\Pi_1$ – коефіцієнт переходу радіонукліда у сільськогосподарській культурі при дощуванні;

q_2 – постачання радіонукліда на угіддя, де вирощується сільськогосподарська культура внаслідок проведення вологозарядкового поливу, Бк/м²рік;

$KП_2$ – коефіцієнт переходу радіонукліда у сільськогосподарські культури при вологозарядковому поливу, Бк(кг сирі маси)/ Бк/м²);
 K_3 – доля утримання i -го радіонукліда, який залишився в i -му харчовому продукті після переробки сільськогосподарського продукту, відносно одиниці;

m_i – споживання i -го продукту людиною, кг/рік.

Отриманні коефіцієнти переходу радіонуклідів з зрошувальної води у продукцію рослинництва подані у таблиці 3.6.

Ведення зрошувального землеробства в умовах радіоактивного забруднення обумовлює помітне посилення втягування радіонуклідів у сільськогосподарські ланцюжки міграції й тому зрошування може стати важливим радіаційно - гігієнічним фактором у формуванні дозових навантажень на населення. Тому це джерело опромінювання людини потребує врахування при організації та виконанні радіаційного контролю.

Таблиця 3.5 – Концентрація радіонуклідів у водоохолоджувачі АЕС та можливе надходження їх на зрошувальні сільськогосподарські угіддя

Радіо- нуклід	Надходження радіонуклідів до угідь, Бк/(м ²					
	Зернові		Картопля, овочі		Трави	
	Д	ВЗ	Д	ВЗ	Д	ВЗ
⁶⁰ Co	192	174	518	104	592	174
⁶⁵ Zn	0,085	0,077	0,23	0,05	0,26	0,077
⁹⁰ Sr	0,41	3,5	10,7	2,1	11,8	3,5
¹⁰⁶ Ru	1,1	0,96	2,9	0,59	3,3	0,96
¹³⁴ Cs	51,8	48,1	144	28,9	163	48,4

Примітка: Д – дощування, ВЗ – вологозарядковий полив.

Завдання для самостійної роботи

Розрахувати постачання радіонуклідів у організм людини за формулою (3.31):

Q1, Co	178	156	149	172	180	156	154	125	136	147
Q1 Zn	0067	0054	0045	0036	007	006	005	0056	0063	006
Q1 Sr	0.41	0.44	0.38	0.47	0.42	0.41	0.43	0.40	0.40	0.36
Q1 Ru	1.1	0.96	0.98	0.97	1.06	1.05	1.00	1.01	1.03	1.04
Q1 Cs	50.2	50.3	49.6	48.0	49.4	49.3	49.9	51.0	50.0	49.9
КЗ кук.	+	+		+	+			+		
КЗ том.		+	+	+	+		+		+	
КЗ кап.			+			+				+
КЗ бур.	+					+	+			
КЗ люц.								+	+	
КЗ озп.										+

Показ-ники	Варианты			Варианты			Варианты			
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Q1, Co	158	163	160	170	173	177	180	183	190	180
Q1 Zn	0061	078	0084	0086	008	007	007	0075	0078	0080
Q1 Sr	0.38	0.37	0.48	0.54	0.50	0.50	0.49	0.48	0.42	0.30
Q1 Ru	0.98	0.99	0.97	1.06	1.07	1.11	1.14	1.00	1.03	1.04
Q1 Cs	49.7	48.3	47.3	49.2	49.0	48.7	45.0	46.8	48.8	48.4
КЗ кук.	+	+		+	+			+		
КЗ том.		+	+	+	+		+		+	
КЗ кап.			+			+				+
КЗ бур.	+					+	+			
КЗ лю.								+	+	
КЗ озп.										+

Показ-ники	Варианты			Варианты			Варианты			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q2, Co	165	144	146	148	152	150	161	153	148	147
Q2 Zn	0060	0050	0040	0043	004	0041	003	0037	0036	0029
Q2 Sr	3.4	3.2	3.1	3.0	2.6	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2
Q2 Ru	3.4	3.2	3.1	3.0	2.6	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2
q2 Cs	43.2	44.5	44.6	45.8	49.0	42.1	42.3	43.8	44.7	40.2
КЗ Co	2.4	2.7	2.8	3.6	3.4	8.5	6.8	6.4	5.6	5.0
КЗ Zn	8.4	8.6	10.0	10.3	9.9	8.7	9.8	8.3	8.4	8.5
КЗ Sr	0.8	1.1	1.6	1.8	2.0	0.86	1.14	1.06	1.04	1.16
КЗ Ru	3.6	3.4	5.6	6.3	6.4	6.0	3.8	3.9	4.9	4.8
КЗ Cs	1.12	1.14	1.56	1.49	1.50	1.48	1.47	1.16	1.2	2.1

Показ-ники	Варианты			Варианты			Варианты			
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Q2, Co	144	143	150	153	155	156	162	143	140	136
Q2 Zn	0031	0032	0034	0038	004	0041	004	0043	0049	0030
Q2 Sr	3.3	3.4	2.8	2.83	2.84	2.83	2.9	2.93	2.95	2.86
Q2 Ru	3.4	3.2	3.1	3.0	2.6	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2
q2 Cs	39.8	39.7	39.4	40.1	40.0	42.0	40.9	38.4	38.5	38.5
K3 Co	6.0	7.0	8.2	8.4	3.9	4.3	5.0	6.0	6.3	6.4
K3 Zn	8.0	9.3	7.8	7.6	7.7	7.5	6.3	6.9	8.7	8.0
K3 Sr	1.18	0.93	0.92	0.96	1.14	1.08	1.12	1.1	1.09	1.03
K3Ru	4.75	3.6	3.9	2.45	2.48	2.49	3.4	6.0	5.4	3.2
K3 Cs	2.1	2.0	3.0	1.9	1.95	2.1	2.03	2.4	2.0	1.8

3.5 Визначення виносу біогенних елементів з сільськогосподарських угідь

Біогенні елементи поступають у гідрографічну мережу від точечних та площадних джерел, розташованих у прибровочних зонах (до 500 м), улоговин, лощин та балок або у водоохоронних зонах рік.

Розрахунок виносу біогенних елементів з сільськогосподарських угідь проводять на основі відомих агрохімічних залежностей, які зв'язують кількість речовин, що виносяться з властивостями ґрунту, видами та врожайністю сільськогосподарських культур.

Розрахункове рівняння для визначення виносу біогенних елементів з ґрунту базується на врожайності сільськогосподарських культур як на інтегральному показнику стану декількох базових факторів (ґрунт, метеорологічні умови, тривалість вегетаційного періоду, кількість добрив, які використовуються, засобів їх внесення та ін.).

Питомий винос біогенних елементів з площі, зайнятою сільськогосподарською культурою (R_i), визначають за формулою:

$$R_i = \alpha_N k_i y_i + \alpha_P k_i y_i + \alpha_K k_i y_i \quad (3.32)$$

де $\alpha_N, \alpha_P, \alpha_K$ – відповідно коефіцієнти виносу азоту, фосфору та калію для різних ґрунтових умов та сільськогосподарських культур (табл. 3.8);

k_i – винос біогенних елементів з ґрунту з урожаєм, кг/т (табл. 3.9);

y_i – фактична врожайність сільськогосподарської культури .

Відповідно загальний винос біогенних речовин з водоохоронної зони річки або іншого водного об'єкту визначають за формулою:

$$\sum W_{III} = \sum_{i=1}^n R_i S_i \quad (3.33)$$

де $\sum W_{III}$ – загальний виніс біогенних елементів з площі водоохоронної зони, кг/у рік;

R_i – питомий виніс біогенних елементів з площі, зайнятої сільськогосподарською культурою;

n – кількість сільськогосподарських культур на площі водоохоронної зони;

S_i – площа, яка зайнята сільськогосподарською культурою, га.

Таблиця 3.8 - Коефіцієнти виносу біогенних речовин .

Культура	Грунти	α_N	A_p	α_K
Озима пшениця	Дерново-підзолисті, Чорноземи звичайні	0,16	0,12	0,07
Озиме жито	Дерново-підзолисті, Чорноземи опідзолені	0,11...0,12 0,28	0,10...0,11 0,11	0,01...0,07 0,36
Ярі зернові	<u>Усі ґрунти</u>	0,12...0,48	0,04...0,12	0,12...0,41
Картопля	Дерново-підзолисті, Чорноземи опідзолені	0,21...0,30 0,13	0,17...0,19 0,12	0,32...0,33 0,21
Багато-річні трави	Усі ґрунти	0,50...0,61	0,15...0,25	0,25...0,60

При розрахунках використовують значення врожайності культури за прогнозом. Площу, зайняту культурою, визначають за фактичними даними господарства про структуру посівів у водоохоронній зоні річки.

Початкову кількість внесених біогенних елементів визначають за формулою (3.34):

$$W_{ИСХ} = \sum_{j=1}^m \Phi_{M_j} W_{CP_j} \quad (3.34)$$

де $W_{исх}$ – вихідна кількість внесених у ґрунт біогенів, кг/рік;

m – кількість видів добрив;

Φ_{M_j} – фізична маса j -го виду добрив, що вносяться, т;

W_{CP_j} – середній вміст біогенних елементів у добриві j -го виду

(табл. 3.10)

Фізичну масу добрив розраховують за формулою:

$$\Phi_{M_j} = \sum_{j=1}^m S_j N_j \quad (3.35)$$

де S_j – площа внесення j -го добрива, га;

N_j – норма внесення j -го добрива, т/га.

Таблиця 3.9 - Винос біогенів з ґрунту з врожаєм сільськогосподарських культур, кг/т .

Культура	Ґрунти	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Озима пшениця	Дерново-підзолисті,	34,0	9,0	20,0
	чорноземи звичайні,	29,0	10,0	27,0
	каштанові	33,0	10,0	25,0
Озиме жито	Дерново-підзолисті, чорноземи звичайні	24,5	12,0	26,0
Яра пшениця	Дерново-підзолисті,	33,0	14,0	26,0
	чорноземи звичайні,	40,0	11,0	23,0
	каштанові	42,0	10,0	32,0
Ярий ячмінь	Дерново-підзолисті,	26,0	10,4	17,0
	чорноземи звичайні	30,4	11,4	22,0
Картопля	Дерново-підзолисті	5,0	1,5	7,0

Кормові культури та багаторічні трави	Усі ґрунти	17,6	6,3	19,5
---------------------------------------	------------	------	-----	------

Використовуючи дані (табл. 3.11), можна визначити долю втрат біогенних елементів та розрахувати їх сумарний винос з ділянки внаслідок порушень технології ($W_{ПОТ}$, кг/рік) за формулою:

$$\sum W_{ПОТ} = \sum_{j=1}^m W_{ИСХ_j} q_j \quad (3.36)$$

де q_j – доля втрат біогенних елементів в наслідок порушень технології внесення ;

$W_{ИСХ_j}$ – вихідна кількість внесення біогенних добрив, кг/рік.

Загальна величина виносу біогенів ($W_{об}$, кг/рік) буде складати:

$$W_{об} = \sum W_{ПЛ} + \sum W_{ПОТ} , \quad (3.37)$$

а коефіцієнт втрат

$$\alpha_{ПОТ} = W_{об} / W_{ИСХ} \quad (3.38)$$

Таблиця 3.10 - Середній вміст біогенних речовин в добривах, %.

Добрива	Азот	Фосфор	Калій
Органічні			
Гній змішаний	0,54	0,25	0,7
Перегній	0,7...2	0,3...1,2	0,9
Торф верховий	0,9	0,1	0,01
Торф низинний	2,0	0,2	0,15
Птичий послід	1,5	1,5	0,9
Стічні води	0,01	0,002	0,004
Аміачні добрива	0,5	0,3	0,4
Мінеральні			
Амофос	11...12	42...44	-
Нітроаммофоска	16	16	16

--	--	--	--

Таблиця 3.11 - Втрати добрив в наслідок порушень технологій їх використання, %.

Вид добрива	Рівень технологій		
	Високий	Середній	Низький
Органічні	5	10	20
Мінеральні	2	4	6

Контрольні запитання

- 1.Що називається біогенними елементами?
- 2.Джерела постачання біогенних елементів.
- 3.На чому засновується розрахунок виносу біогенних елементів з сільськогосподарських угідь.
- 4.Які фактори впливають на якісні характеристики врожаю сільськогосподарських культур?
- 5.Як розраховується питомий виніс біогенів з площі, яку займає сільськогосподарська культура ?.
- 6.За якою формулою розраховується загальний виніс біогенів з водоохоронної зони ?
- 7.Як розраховується початкова кількість внесених у ґрунт біогенів від чого вона залежить?
- 8.За яких умов спостерігається втрата біогенів сільськогосподарськими культурами.
- 9.Як розраховується доля втрат біогенних елементів та загальний виніс внаслідок порушення технології внесення добрив.

Завдання для самостійної роботи

1. Розрахувати фізичну масу добрив.
2. Розрахувати початкову кількість внесених біогенних елементів.
3. Розрахувати сумарний виніс з ділянки внаслідок порушень технології

4. Розрахувати питомий виніс біогенів з площі, зайнятої сільськогосподарською культурою.

5. Розрахувати загальний виніс біогенів з водоохоронної зони річки, враховуючи площу, зайнятою сільськогосподарською культурою.

6. Визначити загальну величину виносу біогенів та коефіцієнт втрат.

7. Дані для розрахунків видаються особисто.

Таблиця 3.12 - Вхідні дані для розрахунку виносу біогенних речовин з врожаєм сільськогосподарських культур

Варіант 1 Одеська область Любашівський район

Показ- ники	Червень			Липень			Серпень			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
T, °C	9.3	9.0	13.1	13.4	16.3	15.9	16.6	18.1	21.2	
SS, год	7	7	7	8	8	8	9	9	10	
D, Мб	3	3	5	6	5	6	8	7	11	
Σ r, мм	23	17	13	11	9	15	18	10	30	
Ур-ть	Озп	2.4	Озж	1.6	яря	2.6	кар	16.0	тра	24.0
Si, га	Озп	120	Озж	30	яря	64	кар	86	тра	56
Sj, га	Гній	50	Пгні	9	амо	12	нам	4	пп	14
Nj, т/га		6		7		3		5		3

Варіант 2 Одеська область ст. Затишся

Показ- ники	Червень			Липень			Серпень			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
T, °C	12.0	13.2	14.1	15.4	17.3	14.9	18.6	18.9	21.6	
SS, год	7	7	8	8	9	9	9	9	10	
d, Мб	4	2	4	5	6	6	9	9	11	
Σ r, мм	13	17	20	13	10	11	11	13	21	
Ур-ть	Озп	2.7	Озж	1.4	яря	2.8	кар	20.0	тра	22.0
Si, га	Озп	140	Озж	45	яря	56	кар	70	тра	34
Sj, га	Гній	60	Пгні	14	амо	14	нам	6	пп	4
Nj, т/га		5		6		2		6		5

Варіант 3 Одеська область ст. Сербка

Показ- ники	Червень			Липень			Серпень			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
t, °C	16.6	17.6	21.8	20.7	23.9	22.7	23.6	19.7	17.0	
SS, год	8	9	9	10	10	11	11	12	12	
d, Мб	5	7	11	9	14	10	13	8	8	
Σ r, мм	16	2	2	0	0	29	1	14	10	
Ур-ть	Озп	1.9	Озж	1.6	яря	2.2	кар	24.0	тра	34.0
Si, га	Озп	160	Озж	56	яря	67	кар	78	тра	54
Sj, га	Гній	63	Пгні	12	амо	16	нам	9	пп	14
Nj, т/га		4		5		1		5		3

Варіант 4

Одеська область ст. Роздільна

Показники	Червень			Липень			Серпень			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
t, °C	15.0	16.7	19.5	17.9	19.4	20.0	22.0	17.0	15.6	
SS, год	9	9	9	10	10	10	11	11	12	
d, Мб	4	5	9	6	8	7	11	6	7	
Σ r, мм	33	34	20	26	20	14	4	17	23	
Ур-ть	Озп	2.0	Озж	1.9	яря	2.1	кар	26.0	тра	17.5
Si, га	Озп	180	Озж	63	яря	64	кар	82	тра	30
Sj, га	Гній	50	пгні	9	амо	12	нам	4	пп	9
Nj, т/га		6		7		3		5		3

Варіант 5

Одеська область ст. Одеса

Показники	Червень			Липень			Серпень			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
t, °C	16.7	18.5	20.8	20.0	21.9	21.0	23.0	18.6	18.5	
SS, год	9	10	10	10	11	11	12	12	10	
d, Мб	5	7	8	8	10	7	10	7	7	
Σ r, мм	42	61	38	15	7	1	13	43	61	
Ур-ть	Озп	2.5	озж	1.9	яря	2.7	кар	19.0	тра	7.9
Si, га	Озп	200	Озж	65	яря	64	кар	104	тра	24
Sj, га	Гній	70	пгні	18	амо	19	нам	14	пп	7
Nj, т/га		8		8		2		7		5

Варіант 6

Одеська область ст. Сарата

Показники	Червень			Липень			Серпень			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
t, °C	16.0	18.4	21.1	20.3	23.0	22.2	23.5	20.0	17.8	
SS, год	9	9	9	9	10	10	11	11	11	
d, Мб	3	7	8	8	12	9	13	9	8	
Σ r, мм	22	6	28	2	0	5	1	8	2	
Ур-ть	Озп	2.5	озж	1.7	яря	2.0	кар	30.0	тра	12
Si, га	Озп	60	Озж	20	яря	19	кар	20	тра	8
Sj, га	Гній	24	пгні	9	амо	10	нам	8	Пп.	5
Nj, т/га		6		7		3		5		3

Варіант 7

Одеська область ст. Болград

Показники	Червень			Липень			Серпень			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
t, °C	16.2	17.9	20.3	19.3	21.5	21.5	23.2	19.1	17.1	
SS, год	9	10	10	10	11	11	12	12	12	
d, Мб	5	7	9	7	11	9	13	9	8	
Σ r, мм	8	8	48	7	3	28	6	2	11	
Ур-ть	Озп	2.7	озж	2.0	яря	2.4	кар	31.0	тра	54
Si, га	Озп	120	Озж	46	яря	64	кар	36	Тра	34
Sj, га	Гній	50	пгні	19	амо	32	нам	14	Пп..	8
Nj, т/га		5		7		6		5		2

Варіант 8

Одеська область ст. Ізмаїл

Показники	Червень			Липень			Серпень			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
t, °C	16.5	17.3	21.7	20.7	23.9	23.1	23.9	1.95	1.72	
SS, год	9	9	10	10	11	11	11	12	12	
d, Мб	4	6	13	12	17	13	16	10	9	
Σ r, мм	26	20	0	0	0	8	4	3	32	
Ур-ть	Озп	2.6	озж	2.0	яря	2.8	кар	24.0	тра	34
Si, га	Озп	95	Озж	34	яря	52	кар	49	тра	14
Sj, га	Гній	50	пгні	19	амо	28	нам	24	пп	8
Nj, т/га		3		8		3		4		3

Варіант 9

Херсонська область ст. Херсон

Показники	Червень			Липень			Серпень			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
t, °C	16.2	18.0	20.9	19.8	21.9	21.8	22.6	18.8	16.9	
SS, год	8	8	9	10	10	11	11	12	12	
d, Мб	4	7	11	9	12	10	12	9	9	
Σ r, мм	96	4	68	0	0	23	3	2	2	
Ур-ть	Озп	1.9	озж	1.3	яря	2.2	кар	22.0	тра	76
Si, га	Озп	145	Озж	80	яря	64	кар	56	тра	34
Sj, га	Гній	90	пгні	39	амо	12	нам	14	пп	12
Nj, т/га		6		7		3		5		3

Варіант 10

Херсонська область ст. Велика Олександрівка

Показники	Червень			Липень			Серпень			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
t, °C	16.7	17.2	21.7	20.7	23.9	23.3	24.0	19.8	17.4	
SS, год	9	9	10	10	10	11	11	11	12	
d, Мб	4	5	12	11	17	13	16	10	10	
Σ r, мм	48	17	0	1	0	6	3	5	6	
Ур-ть	Озп	2.2	озж	1.7	яря	2.5	кар	20.0	тра	59
Si, га	Озп	90	Озж	60	яря	64	кар	36	тра	34
Sj, га	Гній	50	пгні	29	амо	32	нам	19	пп	10
Nj, т/га		6		7		3		5		3

Варіант 11

Херсонська область ст. Нова Каховка

Показники	Червень			Липень			Серпень			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
t, °C	15.7	17.5	20.0	19.0	20.6	20.1	22.8	17.8	16.6	
SS, год	9	9	9	10	10	10	11	11	12	
d, Мб	5	6	8	7	9	7	11	7	8	
Σ r, мм	38	40	35	33	14	20	14	9	1	
Ур-ть	Озп	2.3	озж	1.9	яря	2.7	кар	29.0	тра	30
Si, га	Озп	120	Озж	30	яря	64	кар	86	тра	34
Sj, га	Гній	50	пгні	9	амо	22	нам	34	пп	4
Nj, т/га		6		7		3		5		

Варіант 12

Херсонська область ст. Попелак

Показники	Червень			Липень			Серпень			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
t, °C	16.3	18.6	20.6	19.8	21.8	21.6	22.7	19.4	17.5	
SS, год	9	9	10	10	11	11	11	12	12	
d, Мб	4	7	7	6	10	7	9	8	7	
Σ r, мм	8	11	81	19	2	31	10	3	2	
Ур-ть	Озп	1.9	озж	1.6	яря	2.2	кар	20.0	тра	18
Si, га	Озп	119	Озж	80	яря	64	кар	86	тра	34
Sj, га	Гній	50	пгні	9	амо	12	нам	34	пп	17
Nj, т/га		6		7		3		5		3

Варіант 13

Херсонська область ст. Аскаїя Нова

Показники	Червень			Липень			Серпень			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
t, °C	16.7	19.1	21.1	20.3	22.5	21.1	23.6	18.9	17.9	
SS, год	9	10	10	10	11	11	11	12	12	
d, Мб	4	7	10	8	10	7	11	7	9	
Σ r, мм	22	22	40	22	5	22	0	16	2	
Ур-ть	Озп	1.8	озж	1.6	яря	2.0	кар	21.0	тра	32
Si, га	Озп	120	Озж	30	яря	64	кар	86	тра	54
Sj, га	гній	50	пгні	9	амо	12	нам	4	пп	21
Nj, т/га		6		7		3		5		3

Варіант 14

Херсонська область ст. Бехтери

Показники	Червень			Липень			Серпень			
		2	3	1	2	3	1	2	3	
t, °C	16.6	18.1	21.2	20.2	22.7	22.1	23.1	19.0	17.4	
SS, год	9	9	10	10	11	11	11	12	12	
d, Мб	5	7	11	9	14	10	13	8	8	
Σ r, мм	18	13	30	1	0	3	8	17	3	
Ур-ть	Озп	1.8	озж	1.6	яря	2.4	кар	32.0	тра	13
Si, га	Озп	87	Озж	35	яря	64	кар	86	тра	53
Sj, га	гній	50	пгні	9	амо	43	нам	44	пп	21
Nj, т/га		6		7		3		5		3

Варіант 15

Херсонська область ст. Генічеськ

Показники	Червень			Липень			Серпень			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
t, °C	6.6	7.6	1.8	0.7	3.9	2.7	3.6	9.7	7.0	
SS, год	8	9	9	10	10	11	11	12	12	
D, Мб	5	7	11	9	14	10	13	8	8	
Σ r, мм	16	2	2	0	0	29	1	14	10	
Ур-ть	Озп	2.2	озж	1.7	яря	2.2	кар	26.0	тра	34
Si, га	Озп	90	Озж	50	яря	48	кар	86	тра	34
Sj, га	Гній	42	Пгні	19	амо	21	нам	32	пп	84
Nj, т/га		6		7		3		5		3

Перелік посилань

1. Кирюшин В.И. Экологические основы земледелия. –М.: Колос, 1996. – 223 с.
2. Оценка и регулирование качества окружающей природной среды /В.И.Седлецкий, А.Д.Хованский, Н.С.Серпокрылов и др.; Под ред. Н.Д.Порядина, А.Д.Хованского. –М.: Прибой, 1996. – 132 с.
3. Федоров В.Д., Гильманов Т.Г. Экология. – М.: Изд-во МГУ, 1980
4. Одум Ю. Основы экологии. – М.: Мир, 1974. – 740 с.
5. Прохоров В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах.Физико-химические механизмы и моделирование. /Под ред. Р.М. Алексахина. – М.: Энергоиздат, 1981. – 98 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 - Значення предикторів і предиктанту за певний сезон року
(вихідні дані)

Дата	T ₀	BB ₀	VV ₀	F ₀	H ₁	H ₂	H ₃	γ ₀₋₅₀₀	P`	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.03	-3,4	100	2	100	500	0	0	0,24	0	0,05
4.03	-1,3	90	3	100	0	290	750	0,24	0,1	0,05
6.03	0,4	80	3	100	0	390	760	-0,34	0,25	0,05
9.03	22,4	20	5	96	0	1070	1440	0,1	0,1	0,33
11.03	0,6	40	4	96	0	610	780	0,36	0,14	0,22
14.03	1	150	2	91	0	1620	1750	0,18	0,1	0,3
17.03	1,4	120	4	87	300	0	0	0,88	0,14	0,1
19.03	5,7	350	3	68	0	0	0	0,62	0,19	0,1
21.03	11,1	340	4	75	0	740	810	0,14	0,07	0,08
23.03	6,7	350	3	90	0	480	610	0,68	0,08	0,17
25.03	13,5	350	2	60	0	2150	2230	0,06	0,22	0,34
27.03	11	180	3	70	280	0	0	-0,04	0,08	0,05
29.03	10,3	180	5	73	110	0	0	0,3	0,17	0,19
30.03	10,7	330	3	89	0	0	0	0,06	0,19	0,29
1.04	7,7	150	4	72	0	710	800	0,04	0,16	0,16
3.04	7	140	3	90	80	620	750	0,14	0,25	0,16
5.04	9,3	10	4	84	50	960	1070	0,32	0,21	0,33
7.04	8,5	20	6	62	0	810	900	-0,06	0,08	0,22
9.04	11,9	340	6	62	0	1680	1890	0,06	0,2	0,28
11.04	12,3	30	5	54	0	2360	2560	0,12	0,29	0,33
13.04	8	160	2	92	0	690	910	0,08	0,17	0,27
15.04	6,8	150	3	96	0	380	420	0,58	0,13	0
17.04	7,3	180	2	100	0	650	670	0,02	0,15	0,2
19.04	12,8	290	3	54	0	1130	1990	-0,1	0,19	0,27
21.04	7	150	3	91	0	670	700	-0,34	0,04	0
22.04	10,4	270	3	54	90	0	0	0,96	0	0
23.04	18	140	2	64	0	0	0	0,72	0	0
24.04	17,7	80	2	65	0	0	0	0,42	0	0
25.04	13,7	120	2	87	160	0	0	-0,12	0	0

Продовження табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
27.04	19	90	2	66	0	740	910	-0,22	0,17	0,21
29.04	21,7	160	3	62	0	0	0	0	0	0
4.05	22,9	230	3	56	0	0	0	0,32	0	0,08
5.05	17,9	90	6	85	550	0	0	0,48	0	0,08
7.05	19,6	320	3	82	190	0	0	0,02	0,08	0,12
9.05	20,5	90	2	76	0	0	0	0,8	0,08	0
13.05	19,2	170	3	86	0	0	0	-0,16	0,12	0,22
15.05	16,5	160	3	95	0	460	520	0,28	0,11	0,17
17.05	18,6	350	4	73	0	0	0	0,33	0	0
19.05	18,5	360	3	63	0	0	0	0,17	0	0
23.05	18	90	2	78	0	1710	1920	0,16	0,3	0,32
25.05	21,8	80	1	62	0	0	0	0,22	0	0
28.05	20,5	170	3	83	0	0	0	0,29	0	0

Таблиця А.2 - Значення предикторів і предиктанта, підготовані для введення у програму STEP

10	42	1	3	2	5	6	7			
-3,4	10	2	100	50	0	0	0,24	0	0,05	
-1,3	9	3	100	0	29	75	0,24	0,1	0,05	
0,4	8	3	100	0	39	76	-0,34	0,25	0,05	
22,4	2	5	96	0	107	144	0,1	0,1	0,33	
0,6	4	4	96	0	61	78	0,36	0,14	0,22	
1	15	2	91	0	162	175	0,18	0,1	0,30	
1,4	12	4	87	30	0	0	0,88	0,14	0,10	
5,7	35	3	68	0	0	0	0,62	0,19	0,10	
11,1	34	4	75	0	74	81	0,14	0,07	0,08	
6,7	35	3	90	0	48	61	0,68	0,08	0,17	
13,5	35	2	60	0	215	223	0,06	0,22	0,34	
11	18	3	70	28	0	0	-0,04	0,08	0,05	
10,3	18	5	73	11	0	0	0,3	0,17	0,19	
10,7	33	3	89	0	0	0	0,06	0,19	0,29	
7,7	15	4	72	0	71	80	0,04	0,16	0,16	
7	14	3	90	8	62	75	0,14	0,25	0,16	

9,3	1	4	84	5	96	107	0,32	0,21	0,33
8,5	2	6	62	0	81	90	-0,06	0,08	0,22
11,9	34	6	62	0	168	189	0,06	0,2	0,28
12,3	3	5	54	0	236	256	0,12	0,29	0,33
8	16	2	92	0	69	91	0,08	0,17	0,27
6,8	15	3	96	0	38	42	0,58	0,13	0,00
7,3	18	2	100	0	65	67	0,02	0,15	0,20
12,8	29	3	54	0	113	199	-0,1	0,19	0,27
7	15	3	91	0	67	70	-0,34	0,04	0,00
10,4	27	3	54	9	0	0	0,96	0	0,00
18	14	2	64	0	0	0	0,72	0	0,00
17,7	8	2	65	0	0	0	0,42	0	0,00
13,7	12	2	87	16	0	0	-0,12	0	0,00
19	9	2	66	0	74	91	-0,22	0,17	0,21
21,7	16	3	62	0	0	0	0	0	0,00
22,9	23	3	56	0	0	0	0,32	0	0,08
17,9	9	6	85	55	0	0	0,48	0	0,08
19,6	32	3	82	19	0	0	0,02	0,08	0,12
20,5	9	2	76	0	0	0	0,8	0,08	0,00
19,2	17	3	86	0	0	0	-0,16	0,12	0,22
16,5	16	3	95	0	46	52	0,28	0,11	0,17
18,6	35	4	73	0	0	0	0,33	0	0,00
18,5	36	3	63	0	0	0	0,17	0	0,00
18	9	2	78	0	171	192	0,16	0,3	0,32
21,8	8	1	62	0	0	0	0,22	0	0,00
20,5	17	3	83	0	0	0	0,29	0	0,00

ДОДАТОК Б

Результати розрахунку по програмі STEP

Середні предикторів і предиктанту

11.981 16.736 3.190 78.310 23.100 95.091 114.273 0.215 0.109 0.137

Середньоквадратичні відхилення предикторів і предиктанту

7.179 10.796 1.194 14.853 16.676 57.189 60.787 0.307 0.090 0.121

Матриця нормованих і центрованих значень X

-2,142	-0,624	-0,997	1,46	1,613	0	0	0,083	-1,209	-0,718
-1,85	-0,717	-0,159	1,46	0	-1,156	-0,646	0,083	-0,095	-0,718
-1,613	-0,809	-0,159	1,46	0	-0,981	-0,63	-1,804	1,575	-0,718
1,451	-1,365	1,515	1,191	0	0,208	0,489	-0,372	-0,095	1,603
-1,585	-1,18	0,678	1,191	0	-0,596	-0,597	0,473	0,35	0,691
-1,53	-0,161	-0,997	0,854	0	1,17	0,999	-0,112	-0,095	1,354
-1,474	-0,439	0,678	0,585	0,414	0	0	2,164	0,35	-0,304
-0,875	1,692	-0,159	-0,694	0	0	0	1,319	0,907	-0,304
-0,123	1,599	0,678	-0,223	0	-0,369	-0,547	-0,242	-0,429	-0,47
-0,736	1,692	-0,159	0,787	0	-0,823	-0,876	1,514	-0,318	0,276
0,212	1,692	-0,997	-1,233	0	2,097	1,789	-0,503	1,241	1,686
-0,137	0,117	-0,159	-0,559	0,294	0	0	-0,828	-0,318	-0,718
-0,234	0,117	1,515	-0,357	-0,726	0	0	0,278	0,684	0,442
-0,178	1,506	-0,159	0,72	0	0	0	-0,503	0,907	1,271
-0,596	-0,161	0,678	-0,425	0	-0,421	-0,564	-0,568	0,573	0,193
-0,694	-0,253	-0,159	0,787	-0,905	-0,579	-0,646	-0,242	1,575	0,193
-0,373	-1,458	0,678	0,383	-1,085	0,016	-0,12	0,343	1,129	1,603
-0,485	-1,365	2,353	-1,098	0	-0,246	-0,399	-0,893	-0,318	0,691
-0,011	1,599	2,353	-1,098	0	1,275	1,229	-0,503	1,018	1,188
0,044	-1,272	1,515	-1,637	0	2,464	2,332	-0,307	2,02	1,603
-0,555	-0,068	-0,997	0,922	0	-0,456	-0,383	-0,438	0,684	1,105
-0,722	-0,161	-0,159	1,191	0	-0,998	-1,189	1,189	0,239	-1,133
-0,652	0,117	-0,997	1,46	0	-0,526	-0,778	-0,633	0,461	0,525
0,114	1,136	-0,159	-1,637	0	0,313	1,394	-1,023	0,907	1,105

-0,694	-0,161	-0,159	0,854	0	-0,491	-0,728	-1,804	-0,763	-1,133
-0,22	0,951	-0,159	-1,637	-0,846	0	0	2,425	-1,209	-1,133
0,838	-0,253	-0,997	-0,963	0	0	0	1,644	-1,209	-1,133
0,797	-0,809	-0,997	-0,896	0	0	0	0,668	-1,209	-1,133
0,239	-0,439	-0,997	0,585	-0,426	0	0	-1,088	-1,209	-1,133
0,978	-0,717	-0,997	-0,829	0	-0,369	-0,383	-1,413	0,684	0,608
1,354	-0,068	-0,159	-1,098	0	0	0	-0,698	-1,209	-1,133
1,521	0,58	-0,159	-1,502	0	0	0	0,343	-1,209	-0,47
0,824	-0,717	2,353	0,45	1,913	0	0	0,863	-1,209	-0,47
1,061	1,414	-0,159	0,248	-0,246	0	0	-0,633	-0,318	-0,138
1,187	-0,717	-0,997	-0,155	0	0	0	1,904	-0,318	-1,133
1,006	0,024	-0,159	0,518	0	0	0	-1,218	0,127	0,691
0,629	-0,068	-0,159	1,124	0	-0,858	-1,024	0,213	0,016	0,276
0,922	1,692	0,678	-0,357	0	0	0	0,376	-1,209	-1,133
0,908	1,784	-0,159	-1,031	0	0	0	-0,145	-1,209	-1,133
0,838	-0,717	-0,997	-0,021	0	1,327	1,279	-0,177	2,131	1,52
1,368	-0,809	-1,834	-1,098	0	0	0	0,018	-1,209	-1,133
1,187	0,024	-0,159	0,316	0	0	0	0,245	-1,209	-1,133

Суміщена матриця коеф. кореляції R_{ij} і коеф. значущості t_{ij}

1	0,099	-0,054	-0,49	-0,074	0,234	0,228	-0,032	-0,319	-0,115
0,641	1	-0,052	-0,276	-0,087	0,093	0,091	0,076	-0,077	-0,066
0,35	0,334	1	-0,096	0,1	0,106	0,105	0,004	0,141	0,262
4,128	1,917	0,617	1	0,173	-0,505	-0,52	-0,084	0,1	0,039
0,478	0,562	0,65	1,141	1	0,034	0,048	0,032	-0,284	-0,156
1,588	0,6	0,689	4,338	0,219	1	0,953	-0,06	0,296	0,481
1,537	0,591	0,683	4,566	0,309	66,541	1	-0,097	0,314	0,482
0,203	0,489	0,023	0,543	0,206	0,387	0,624	1	-0,252	-0,282
2,277	0,497	0,923	0,644	1,975	2,079	2,23	1,724	1	0,73
0,744	0,423	1,8	0,251	1,023	4,012	4,02	1,96	10,013	1

КРОК 1-й

Вільний член $A[0] = -5.0076751424E-13$

Частинний коеф. регресії:

$A[1] = 0.730$ Коеф. значущості $t_a = 6.758$ Предиктор 9

Множинний коеф. кореляції $R_{mk} = 0.730$

КРОК 2-й

Вільний член $A[0] = -3.8015203159E-13$

Частинні коеф. регресії:

$A[1] = 0.644$ Коеф. значущості $t_a = 6.524$ Предиктор 9

$A[2] = 0.397$ Коеф. значущості $t_a = 2,943$ Предиктор 6

Множинний коеф. кореляції $R_{mk} = 0.781$

КРОК 3-й

Вільний член $A[0] = -2.1273151664E-12$

Частинні коеф. регресії:

$A[1] = 0.627$ Коеф. значущості $t_a = 6.519$ Предиктор 9

$A[2] = 0.383$ Коеф. значущості $t_a = 2,917$ Предиктор 6

$A[3] = 0.143$ Коеф. значущості $t_a = 1.492$ Предиктор 3

Множинний коеф. кореляції $R_{mk} = 0.794$

КРОК 4-й

Вільний член $A[0] = -3.1646249354E-14$

Частинні коеф. регресії:

$A[1] = 0.571$ Коеф. значущості $t_a = 6.163$ Предиктор 9

$A[2] = 0.538$ Коеф. значущості $t_a = 4.254$ Предиктор 6

$A[3] = 0.158$ Коеф. значущості $t_a = 1.703$ Предиктор 3

$A[4] = 0.196$ Коеф. значущості $t_a = 2.118$ Предиктор 4

Множинний коеф. кореляції $R_{mk} = 0.810$

КРОК 5-й

Вільний член $A[0] = -1.4102225261E-13$

Частинні коеф. регресії:

$A[1] = 0.546$ Коеф. значущості $t_a = 5,979$ Предиктор 9

$A[2] = 0.534$ Коеф. значущості $t_a = 4.287$ Предиктор 6

$A[3] = 0.161$ Коеф. значущості $t_a = 1.768$ Предиктор 3

$A[4] = 0.189$ Коеф. значущості $t_a = 2.069$ Предиктор 4

$A[5] = -0,105$ Коеф. значущості $t_a = 1.153$ Предиктор 8

Множинний коеф. кореляції $R_{mk} = 0.816$

КРОК 6-й

Вільний член $A[0] = -1.3437117873E-13$

Частинні коеф. регресії:

$A[1] = 0.581$ Коеф. значущості $t_a = 6.426$ Предиктор 9

$A[2] = 0.517$ Коеф. значущості $t_a = 4.188$ Предиктор 6

$A[3] = 0.167$ Коеф. значущості $t_a = 1.851$ Предиктор 3

$A[4] = 0.230$ Коеф. значущості $t_a = 2.548$ Предиктор 4

A[5] = -0.091 Коэф. значущості $t_a = 1.002$ Предиктор 8
A[6] = 0.101 Коэф. значущості $t_a = 1.120$ Предиктор 1
Множинний коэф. кореляції $R_{mk} = 0.820$

КРОК 7-й

Вільний член $A[0] = 4.4601235607E-14$

Частинні коэф. регресії:

A[1] = 0.547 Коэф. значущості $t_a = 6.080$ Предиктор 9
A[2] = 0.551 Коэф. значущості $t_a = 4.490$ Предиктор 6
A[3] = 0.178 Коэф. значущості $t_a = 1,978$ Предиктор 3
A[4] = 0.254 Коэф. значущості $t_a = 2.823$ Предиктор 4
A[5] = -0.094 Коэф. значущості $t_a = 1.044$ Предиктор 8
A[6] = 0.092 Коэф. значущості $t_a = 1.017$ Предиктор 1
A[7] = -0.135 Коэф. значущості $t_a = 0.739$ Предиктор 5
Множинний коэф. кореляції $R_{mk} = 0.822$

КРОК 8-й

Вільний член $A[0] = 9.6109847785E-14$

Частинні коэф. регресії:

A[1] = 0.536 Коэф. значущості $t_a = 5.979$ Предиктор 9
A[2] = 0.377 Коэф. значущості $t_a = 3.075$ Предиктор 6
A[3] = 0.180 Коэф. значущості $t_a = 2.005$ Предиктор 3
A[4] = 0.268 Коэф. значущості $t_a = 2.990$ Предиктор 4
A[5] = -0.089 Коэф. значущості $t_a = 0.989$ Предиктор 8
A[6] = 0.092 Коэф. значущості $t_a = 1.022$ Предиктор 1
A[7] = -0.152 Коэф. значущості $t_a = 0.835$ Предиктор 5
A[8] = 0.199 Коэф. значущості $t_a = 1.622$ Предиктор 7
Множинний коэф. кореляції $R_{mk} = 0.824$

КРОК 9-й

Вільний член $A[0] = -6.6196257950E-04$

Частинні коэф. регресії:

A[1] = 0.537 Коэф. значущості $t_a = 5.988$ Предиктор 9
A[2] = 0.376 Коэф. значущості $t_a = 3.072$ Предиктор 6
A[3] = 0.181 Коэф. значущості $t_a = 2.016$ Предиктор 3
A[4] = 0.272 Коэф. значущості $t_a = 3.035$ Предиктор 4
A[5] = -0.089 Коэф. значущості $t_a = 0.994$ Предиктор 1
A[6] = 0.093 Коэф. значущості $t_a = 1.033$ Предиктор 8
A[7] = -0.151 Коэф. значущості $t_a = 0.829$ Предиктор 5
A[8] = 0.200 Коэф. значущості $t_a = 1.630$ Предиктор 7
A[9] = 0.012 Коэф. значущості $t_a = 0.139$ Предиктор 2
Множинний коэф. кореляції $R_{mk} = 0.824$