

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

В. В. БЛАГОДАТНИЙ, Н. І. МАГАСЬ

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

У двох частинах

Частина 2

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електронне видання комбінованого
використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ • НУК • 2011

УДК 504.064.2 (076)

ББК 20.1

Б 68

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

Рецензент д-р техн. наук, професор К. В. Кошкін

Кафедра екологічної безпеки

Благодатний В. В.

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

Наведено методики для моделювання процесів забруднення стічними водами водойм, водотоків та морів. Викладено теоретичні основи існуючих методик розрахунку кратності розбавлення води різних водних об'єктів. Наведено приклади розрахунку показників забруднення води.

Призначено для студентів денної та заочної форм навчання зі спеціальності 6.040106 "Екологія, охорона навколишнього природного середовища та збалансоване природокористування" та 8.050101 "Комп'ютерний еколого-економічний моніторинг".

УДК 504.064.2 (076)

ББК 20.1

Навчальне видання

БЛАГОДАТНИЙ Володимир Валентинович
МАГАСЬ Наталія Іванівна

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

У двох частинах

Частина 2

Комп'ютерне верстання *В.Г. Мазанко*
Коректор *М.О. Паненко*

© Благодатний В. В.,
Магась Н. І., 2011

© Видавництво НУК, 2011

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 2,0. Обсяг даних 1474 кб.

Тираж 30. Вид. № 23. Зам. № 452.

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

E-mail : publishing@nuos.edu.ua

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

ВСТУП

Розв'язання завдання моделювання поширення стічних вод у водотоках та водоймах полягає у визначенні кратності розбавлення стічних вод, тобто відношення суми витрат стічних вод та водного об'єкту до витрат стічних вод. Оскільки з іншого боку кратність розбавлення дорівнює відношенню надлишкових концентрацій забруднень у місці випуску до їхніх концентрацій у розрахунковому створі, знаючи кратність розбавлення можна визначити концентрацію одного або декількох забруднюючих компонентів у будь-якій точці даного водного об'єкту, що піддається впливу стічних вод.

На теперішній час розроблено значну кількість методик визначення розбавлення стічних вод у різних водних об'єктах, що дуже часто розрізняються між собою за прийнятими припущеннями та за сферами використання. Деякі з цих методик включені до нормативних документів, таких як Інструкція про порядок розробки та затвердження гранично допустимих скидів (ГДС) речовин у водні об'єкти із зворотними водами, Інструкція про розроблення гранично допустимих скидів для об'єктів, що здійснюють скид зворотних вод до морів та інші.

Тому, виконання студентами практичних робіт з дисципліни «Моделювання та прогнозування стану довкілля» передбачає оволодіння теоретичними положеннями, що лежать в основі зазначених методик, а також набуття ними вмінь та навичок у проведенні відповідних розрахунків.

Матеріали методичних вказівок можуть бути використані студентами денної та заочної форми навчання спеціальності 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього природного середовища та збалансоване природокористування», 8.050101 «Комп'ютерний еколого-економічний моніторинг» при виконанні курсових робіт з дисциплін: «Моделювання та прогнозування стану довкілля», «Джерела забруднення навколишнього середовища», «Техно-екологія», «Природоохоронні технології», «Математичні моделі в задачах охорони навколишнього середовища» та при написанні дипломних робіт.

Практична робота № 8

Визначення ступеню розбавлення стічних вод у річках

Загалом, перенесення розчинених і завислих речовин в природних потоках описується рівнянням турбулентної дифузії:

$$v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} - D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = -\frac{\partial C}{\partial t}, \quad (8.1)$$

де x, y, z – координатні осі відповідно вздовж потоку, нормально до напрямку потоку у горизонтальній площині, наприклад від лівого берега до правого, та у вертикальній площині, наприклад, згори до низу; v_x, v_y , та v_z – компоненти швидкості течії за відповідними координатами, м/с; D – коефіцієнти турбулентної дифузії, м²/с; у загальному випадку $D_x \neq D_y \neq D_z$; C – концентрація забруднюючої речовини у воді, мг/л; t – час, с.

Розв'язок рівняння турбулентної дифузії не можливо отримати аналітичним шляхом, оскільки їх неможливо доповнити кількістю рівнянь, що дорівнювало б кількості невідомих, і тим самим отримати замкнуту систему. Тому для отримання значень концентрації компонента використовують чисельні методи або спрощені форми рівняння (8.1).

Перш за все у прогностичних розрахунках стан води вважається стаціонарним, тобто $\partial C / \partial t = 0$. Оскільки розрахунки ведуться для постійних витрат води у річці, відповідно, й швидкість течії буде постійною величиною, тобто $\partial v_x / \partial t = 0$. Крім того, при розрахунках доцільно застосовувати метод кусково-постійної функції, розглядаючи ділянки річки з відносно однорідними гідравлічними умовами, в межах яких можна знехтувати змінами швидкості течії, тобто $\partial v_x / \partial x = 0$.

Якщо вважати потік прямолінійним, то поперечні складові швидкості можна прийняти рівними нулю, тобто $v_y = 0$ та $v_z = 0$. Звивистість русла, при цьому, враховують за допомогою спеціальних коефіцієнтів. Дослідження процесів змішування й розбавлення стічних вод у річках, показали, що при глибинах 3-5 м та при швидкостях течії до 0,6 м/с вже безпосередньо поблизу випуску стічних вод спостерігається швидке вирівнювання концентрацій по глибині потоку. Отже, можна приймати $\partial C / \partial z = 0$ та $\partial^2 C / \partial z^2 = 0$.

У реальних річкових потоках через складності будови дна річки та наявності макрокомпонентів його рельєфу потік постійно подрібнюється, напрямки його руху змінюється, забруднений струмінь розмивається, концентрація речовини за шириною річки стає приблизно однаковою. Отже, можна прийняти концентрації речовини за шириною забрудненого струменя осередненими у максимально забрудненому струмені, тобто $\partial C / \partial y = 0$ та $\partial^2 C / \partial y^2 = 0$.

З урахування перерахованих припущень вираз (8.1) можна представити у вигляді:

$$v_x \frac{\partial C}{\partial x} - D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0. \quad (8.2)$$

Вираз (8.2) при відповідних перетвореннях приводить до рівняння, що було використано В. А. Фроловим для отримання формул, що характеризують розбавлення в його методі.

У відповідності до цього методу розрахунку, швидкість турбулентного потоку у рівнянні 8.2. замінюється відношенням $v = x/t$. Позначимо $D/x^2 = \lambda(t)$. Отримаємо рівняння:

для максимально забрудненого струменя

$$\frac{\partial C_{\max}}{\partial t} = -\lambda(t) \cdot (C_{\max} - C_{\text{сер}}); \quad (8.3)$$

для мінімально забрудненого струменя

$$\frac{\partial C_{\min}}{\partial t} = -\lambda(t) \cdot (C_{\min} - C_{\text{сер}}). \quad (8.4)$$

де $C_{\text{сер}}$ – середня концентрація забруднювача у створі повного змішування, що визначається за формулою

$$C_{\text{сер}} = \frac{(q \cdot C_{\text{ст}} + Q \cdot C_{\text{ф}})}{(q + Q)}, \quad (8.5)$$

де $C_{\text{ст}}$ – концентрація забруднювача у стічній воді; $C_{\text{ф}}$ – фоновая концентрація того ж забруднювача у річковій воді вище випуску стічних вод; Q – середньомісячна витрата води водотоку, $\text{м}^3/\text{с}$; q – максимальна витрата стічних вод, що підлягають скиданню до водотоку, $\text{м}^3/\text{с}$.

Проінтегрувавши ці рівняння отримаємо:

для максимально забрудненого струменя

$$C_{\max} = C_{\text{сер}} + (C_{\text{ст}} - C_{\text{сер}}) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}; \quad (8.6)$$

для мінімально забрудненого струменя

$$C_{\min} = C_{\text{сер}} - (C_{\text{сер}} - C_{\text{ф}}) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (8.7)$$

У цих рівняннях

$$\int_0^t \lambda(t) dt = \varphi^a \cdot \xi^b \cdot (Dl/q)^c. \quad (8.8)$$

Параметри, що входять до рівняння (8.8) враховують особливості руху рідини у річці.

Звивистість річища, що впливає на утворення поперечних циркуляцій, які прискорюють змішування стічних вод, оцінюється безрозмірним коефіцієнтом φ . Його числове значення дорівнює відношенню відстані від випуску стічних вод до розрахункового створу по осі потоку або фарватеру l до відстані по прямій $l_{\text{п}}$.

Вплив місця скиду стічних вод у річковий потік враховують за допомогою безрозмірного коефіцієнта ξ . За результатами спостережень при випуску стічних вод безпосередньо в потік змішування протікає приблизно в 1,5 разів інтенсивніше, ніж при скиді біля берега, отже при випуску стічних вод біля берега $\xi = 1$, а у потік – $\xi = 1,5$.

Показники ступеню a та b В.А. Фроловим були прийняті рівними 1, а величина показника c рівною $1/3$, що дає найбільший збіг розрахункових параметрів з натурними.

Позначимо комплекс величин, що визначають гідравлічні умови змішування

$$\alpha = \xi \cdot \varphi \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{q}}. \quad (8.9)$$

При цьому коефіцієнт турбулентної дифузії можна визначати за формулою М.В. Потапова:

$$D = \frac{V_{\text{сер}} \cdot H_{\text{сер}}}{200}, \quad (8.10)$$

де $V_{\text{сер}}$ – середня швидкість течії водотоку на ділянці між нульовим і розрахунковим створами, м/с; $H_{\text{сер}}$ – середня глибина на цій ділянці, м.

Формула 8.5. є справедливою для прогнозування стану рівнинних річок.

За більш складних гідравлічних умов на ділянці змішування слід використовувати формули, що враховували б вплив шорсткості річища та інших факторів на течію води. Найповніше ці особливості враховуються формулою А.В. Караушева:

$$D = \frac{g \cdot H_{\text{сер}} \cdot V_{\text{сер}}}{M \cdot C}, \quad (8.11)$$

де C – коефіцієнт Шезі; M – коефіцієнт залежний від C . За умови $10 < C < 60$, $M = 0,7 \cdot C + 6$, а при $C \geq 60$ $M = \text{const} = 48$.

У гідравлічних розрахунках коефіцієнт Шезі характеризує інтенсивність турбулентного перемішування водних мас. Більш інтенсивне перемішування відповідає меншим значенням i , навпаки, при більших величинах коефіцієнту Шезі перемішування слабше.

У випадку вимірювання гідравлічного нахилу I значення коефіцієнту Шезі розраховують за формулою

$$C = \frac{V_{\text{сер}}}{\sqrt{R \cdot I}}, \quad (8.12)$$

де $R = A/I$ – гідравлічний радіус, м; A – площа живого перерізу потоку, м²; I – периметр змочування, м.

За відсутності даних про гідравлічний нахил його значення розраховують за формулою Павловського

$$C = \frac{1}{n_{\text{ш}}} \cdot R^y, \quad (8.13)$$

де $n_{\text{ш}}$ – коефіцієнт шорсткості річища, що визначається в залежності від характеру русла (таблиця 8.1); y – показник, що є функцією коефіцієнта шорсткості та гідравлічного радіуса.

Таблиця 8.1. Значення коефіцієнту шорсткості річища

Характеристика русла	$n_{\text{ш}}$
Річки з піщаним руслом, рівним, без рослинності, з незначним переміщенням донних наносів	0,020...0,023
Річки з піщаним звивистим руслом, зі значним переміщенням донних наносів	0,020...0,023
Заплава, вкрита травою	0,023...0,033
Заплава, вкрита чагарником або рідким лісом	0,033...0,045
Заплава, вкрита лісом	0,045...0,060

Значення показника y визначають за формулами:

$$\text{при } R < 1 \quad y = 1,5 \cdot \sqrt{n_{\text{ш}}}; \quad (8.14)$$

$$\text{при } R > 1 \quad y = 1,3 \cdot \sqrt{n_{\text{ш}}}. \quad (8.15)$$

Для широких річок гідравлічний радіус приймають рівним середній глибині річки, тобто $R = H$. У цьому випадку периметр змочування I буде дорівнювати середній ширині річки B .

Після інтегрування рівнянь (8.3, 8.4) та за результатами лабораторних і натурних досліджень В.А. Фроловим було отримано розрахункові формули:

для максимально забрудненого струменя

$$C_{\text{max}} = C_{\text{сер}} + (C_{\text{ст}} - C_{\text{сер}}) \cdot e^{-\alpha \cdot \sqrt[3]{I}}; \quad (8.16)$$

для мінімально забрудненого струменя

$$C_{\text{min}} = C_{\text{сер}} - (C_{\text{сер}} - C_{\text{ф}}) \cdot e^{-\alpha \cdot (\sqrt[3]{I} - \sqrt[3]{I_0})}, \quad (8.17)$$

де l_0 – відстань, на якій забруднений струмінь пошириться по всій ширині річки, м

$$l_0 = \left(\frac{1}{\alpha} \ln \frac{Q}{q} \right)^3. \quad (8.18)$$

На основі рівняння балансу речовин за додатковими концентраціями І.Д. Родзіллером було отримано рівняння для розрахунку коефіцієнта змішування, що показує, яка частина річної витрати води використовується для розбавлення стічної води у максимально забрудненому струмені

$$\gamma = \frac{1 - e^{-\alpha \sqrt[3]{l}}}{1 + \frac{Q}{q} \cdot e^{-\alpha \sqrt[3]{l}}}. \quad (8.19)$$

Тоді коефіцієнт розбавлення визначають за формулою

$$n = \frac{\gamma \cdot Q + q}{q}. \quad (8.20)$$

Якщо в процесі руху стічних вод до розрахункового створу на окремих ділянках гідравлічні умови змінюються, розрахункову відстань розбивають на ділянки, межами яких є створи, де змінюються значення ширини та глибини річки, звивистість річища тощо. Розрахунок послідовно проводять по i -тих ділянках за формулами:

$$D_i = \frac{g \cdot H_i \cdot V_i}{37 \cdot n_{\text{ши}} \cdot C_i^2}; \quad (8.21)$$

$$\alpha_i = 1,5 \cdot \varphi_i \cdot \sqrt[3]{\frac{D_i}{Q_{i \text{ заг}}}}; \quad (8.22)$$

$$\gamma = \frac{1 - e^{-\alpha_i \sqrt[3]{l_s}}}{1 + \frac{Q_{i-1}}{Q_{i-1 \text{ заг}}} \cdot e^{-\alpha_i \sqrt[3]{l_i}}}; \quad (8.23)$$

$$n_i = \frac{(Q_{i-1 \text{ заг}} + \gamma_i \cdot Q_{i-1})}{Q_{i-1 \text{ заг}}}; \quad (8.24)$$

$$C_i = C_{\phi} + \frac{(C_{i-1} - C_{\phi})}{n_i}, \quad (8.25)$$

де кількість забрудненої води $Q_{i \text{ заг}}$ та кількість чистої води Q_i , що поступила у розрахункову точку визначають за формулами

$$Q_{i \text{ заг}} = q + Q_i ; \quad (8.26)$$

$$Q_i = Q - Q_{i \text{ заг}}. \quad (8.27)$$

Приклад 8: Планується скидати у водотік стічні води промислового підприємства з максимальною витратою $q = 2,0 \text{ м}^3/\text{с}$. Фонова концентрація хлоридів складає $7,5 \text{ мг/л}$. У стічній воді концентрація хлоридів дорівнює 265 мг/л .

Нижче за течією від планованого берегового випуску стічних вод, на відстані $2,5 \text{ км}$ знаходиться селище **М.**, мешканці якого використовують воду водотоку для купання та відпочинку. Середньомісячна витрата водотоку $Q = 27 \text{ м}^3/\text{с}$; середня глибина – $1,2 \text{ м}$; середня швидкість течії – $1,4 \text{ м/с}$; коефіцієнт Шезі на цій ділянці $C = 38 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$; звивистість русла слабо виражена.

Визначити вплив стічних вод на водойму та кратність розбавлення стічних вод у розрахунковому створі. Випуск стічних вод – береговий.

Розв’язок. Оскільки водотік є водним об’єктом призначеним для культурно-побутового водокористування, встановлюємо розрахунковий створ за 1000 м до межі селища.

У цьому випадку відстань, прийнята для розрахунку довжини ділянки розбавлення:

$$l = 2500 - 1000 = 1500 \text{ м.}$$

Визначимо коефіцієнт турбулентної дифузії за формулою (8.11):

$$D = \frac{9,8 \cdot 1,4 \cdot 1,2}{32,6 \cdot 38} = 0,01.$$

$$\text{Оскільки } 10 < C < 60, \text{ звідси } M = 0,7 \cdot C + 6 = 0,7 \cdot 38 + 6 = 32,6.$$

Оскільки випуск береговий, а звивистість русла слабо виражена, то за формулою (8.9) визначимо:

$$\alpha = 1 \cdot 3 \sqrt[3]{\frac{0,01}{2,0}} = 0,17.$$

Для спрощення обчислення коефіцієнта змішування за формулою (8.19) попередньо обчислимо:

$$\beta = e^{-\alpha \cdot \sqrt[3]{L}} = e^{-0,17 \cdot \sqrt[3]{1500}} = 0,143.$$

Тоді

$$\gamma = \frac{1 - \beta}{1 + \frac{Q}{q} \cdot \beta} = \frac{1 - 0,143}{1 + \frac{27}{2,0} \cdot 0,143} = 0,292.$$

Кратність розбавлення стічних вод промислового підприємства у розрахунковому створі згідно виразу (8.20) складатиме:

$$n = \frac{0,292 \cdot 27 + 2,0}{2,0} = 4,9.$$

За формулою (8.5) визначаємо середню концентрацію забруднювача у створі повного змішування

$$C_{\text{сер}} = \frac{(2,0 \cdot 265 + 27 \cdot 7,5)}{(2,0 + 27)} = 25,3 \text{ мг/л.}$$

Концентрація хлоридів для максимально забрудненого струменя у розрахунковому створі за рівнянням (8.16) складає

$$C_{\text{max}} = 25,3 + (265 - 25,3) \cdot 2,7^{-0,17 \cdot \sqrt[3]{1000}} = 77,5 \text{ мг/л.}$$

Практична робота № 9

Розрахунок кратності розбавлення стічних вод

методом А. В. Караушева

Метод А. В. Караушева розроблений для визначення поля концентрації забруднюючих речовин у межах всієї розглядуваної ділянки, від місця скиду стічних вод до контрольного створу будь-яких водоймищ (річок, озер, водосховищ). В основі методу лежить розв'язання рівняння турбулентної дифузії (8.1).

Основними спрощеннями методу є рівнозначність коефіцієнтів турбулентної дифузії за координатними напрямками ($D_x = D_y = D_z = D$) та нехтування значення $\partial^2 C / \partial x^2 = 0$, внаслідок малої швидкості зміни концентрації компонента за напрямком x .

Тоді рівняння (8.1) набуває вигляду

$$v_x \frac{\partial C}{\partial x} - D \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = 0. \quad (9.1)$$

Сутність методу А.В. Караушева полягає у заміні у рівнянні (9.2) диференціалів ∂C , ∂x , ∂y , і ∂z на малі кінцеві різниці або кінцеві прирости ΔC , Δx , Δy і Δz , тоді

$$\frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{D}{v_x} \cdot \left(\frac{\Delta_y^2 C}{\Delta y^2} + \frac{\Delta_z^2 C}{\Delta z^2} \right). \quad (9.2)$$

Розділимо всю область потоку на відрізки:

Δx – вздовж осі x вертикальними площинами, паралельними площині zoy ;

Δy – вздовж осі y вертикальними площинами, паралельними площині zox ;

Δz – вздовж осі z вертикальними площинами, паралельними площині uox .

Отримуємо систему паралелепіпедів зі сторонами Δx , Δy і Δz . Пронумеруємо кожен паралелепіпед вздовж осі x через 1, 2, ..., $k-1$, k , $k+1$; $k+2$ і т. д.;

вздовж осі y через $1, 2, \dots, n-1, n, n+1, n+2$ і т. д., вздовж осі z через $1, 2, \dots, m-1, m, m+1, m+2$ і т. д. Тоді концентрація речовини у розрахунковому паралелепіпеді під номером k, n, m визначається за формулою

$$C_{k,n,m} = \frac{1}{4} \cdot (C_{k-1,n-1,m} + C_{k-1,n,m-1} + C_{k-1,n+1,m} + C_{k-1,n,m+1}). \quad (9.3)$$

Отже, концентрація речовини у кожному паралелепіпеді розрахункового k -го перерізу є середнім арифметичним концентрацій чотирьох паралелепіпедів, які межують з розрахунковим у попередньому $k-1$ -му перерізі вздовж потоку.

Таким чином, формула А. В. Караушева дозволяє встановити розрахунковим шляхом концентрації речовин у паралелепіпедах наступного перерізу за розподілом концентрацій у паралелепіпедах попереднього перерізу [2].

У розрахунках величина Δz для даного просторового завдання приймається рівною частині глибини, наприклад $1/3 \dots 1/5$ від загальної глибини H ; Δy приймається рівним Δz , а Δx визначається за формулою

$$\Delta x = \frac{\rho \cdot v_x \cdot \Delta y^2}{4g \cdot A_{\text{сер}}}, \quad (9.4)$$

де ρ – густина; g – прискорення вільного падіння; $A_{\text{сер}}$ – коефіцієнт турбулентного обміну.

Величина $A_{\text{сер}}$ визначається за формулою В.М. Маккавєєва

$$A_{\text{сер}} = \frac{\rho \cdot H_{\text{сер}} \cdot v_{\text{сер}}}{2m \cdot C}, \quad (9.5)$$

або за формулою А.В.Караушева

$$A_{\text{сер}} = \frac{\rho \cdot H_{\text{сер}} \cdot v_{\text{сер}}}{M \cdot C}, \quad (9.6)$$

в яких $m = 22,3$ – коефіцієнт Буссінеска, M – коефіцієнт, що залежний від коефіцієнта Шезі. За умови $10 < C < 60$, $M = 0,7 \cdot C + 6$, а при $C \geq 60$ $M = \text{const} = 48$.

Коефіцієнт турбулентного обміну пов'язаний з коефіцієнтом турбулентної дифузії співвідношенням

$$A_{\text{сер}} = \frac{\rho \cdot D}{g}. \quad (9.7)$$

Після підстановки цього співвідношення у формулу (9.4) отримаємо:

$$\Delta x = \frac{v_x \cdot \Delta y^2}{4D}. \quad (9.8)$$

Формула (9.8) справедлива для паралелепіпедів, що оточені в попередньому перерізі з усіх чотирьох сторін водою. В той же час, поверхневі, придонні або прибережні паралелепіпеди оточені водою тільки з трьох сторін: поверхневі паралелепіпеди – праворуч, ліворуч та знизу; придонні – праворуч, зверху та ліворуч; прибережні – зверху, знизу та праворуч (для лівого берега) чи ліворуч (для правого берега). Поверхневі ж та придонні паралелепіпеди, що прилягають до берега у попередньому перерізі оточені водою тільки з двох сторін. Між тим для просторового завдання розрахункова формула повинна обов'язково містити чотири доданки. Для отримання відсутніх доданків А. В. Караушев запропонував умовно поширювати розрахункову сітку за межі потоку, тобто екстрапольовати концентрацію таких паралелепіпедів за поверхні, що їх обмежують.

При цьому концентрацію речовини у екстрапольованій сітці $C_{\text{експ}}$ слід приймати рівною концентрації речовини в сусідній клітині, відділеній від екстрапольованої межею (поверхнею, дном, берегом), тобто $C_{\text{експ}} = C_{\text{меж}}$. Тоді формула (9.3) набуває вигляду [1]:

для паралелепіпедів на поверхні

$$C_{k,n,1} = \frac{1}{4} \cdot (C_{k-1,n-1,1} + C_{k-1,n,1} + C_{k-1,n+1,1} + C_{k-1,n,2}) \quad (9.9)$$

для паралелепіпедів біля дна

$$C_{k,n,m_d} = \frac{1}{4} \cdot (C_{k-1,n-1,m_d} + C_{k-1,n,m_d-1} + C_{k-1,n+1,m_d} + C_{k-1,n,m_d}) \quad (9.10)$$

для паралелепіпедів біля лівого берега (при спрямуванні осі у від лівого берега до правого)

$$C_{k,1,m} = \frac{1}{4} \cdot (C_{k-1,1,m} + C_{k-1,1,m-1} + C_{k-1,2,m} + C_{k-1,1,m+1}) \quad (9.11)$$

для паралелепіпедів біля правого берега

$$C_{k,n_n,m} = \frac{1}{4} \cdot (C_{k-1,n_n,m} + C_{k-1,n_n,m-1} + C_{k-1,n_n,m} + C_{k-1,n_n,m+1}) \quad (9.12)$$

для паралелепіпедів, розташованих у куті: лівий берег – поверхня

$$C_{k,1,1} = \frac{1}{4} \cdot (2C_{k-1,1,1} + C_{k-1,2,1} + C_{k-1,1,2}) \quad (9.13)$$

для паралелепіпедів, розташованих у куті: лівий берег – дно

$$C_{k,1,m_d} = \frac{1}{4} \cdot (2C_{k-1,1,m_d} + C_{k-1,1,m_d-1} + C_{k-1,2,m_d-1}) \quad (9.14)$$

для паралелепіпедів, розташованих у куті: правий берег – поверхня

$$C_{k,n_n,1} = \frac{1}{4} \cdot (2C_{k-1,n_n,1} + C_{k-1,n_n-1,1} + C_{k+1,n_n,2}) \quad (9.15)$$

для паралелепіпедів, розташованих у куті: правий берег – дно

$$C_{k,n_n,m_\partial} = \frac{1}{4} \cdot (2C_{k-1,n_n,m_\partial} + C_{k-1,n_n-1,m_\partial} + C_{k-1,n_n,m_\partial-1}) \quad (9.16)$$

Для відносно неглибоких водойм (до 10 м) з достатньою швидкістю руху води (приблизно 0,1 м/с та більше), в яких прийнято $\partial C / \partial z = 0$ та $\partial^2 C / \partial z^2 = 0$, а отже розв'язується так зване плоске завдання, рівняння (8.1) та похідне від нього (9.1) має вигляд:

$$v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = 0. \quad (9.17)$$

Замінивши у виразі (9.17) диференціали на малі кінцеві прирости, знаходимо:

$$\frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{D}{v_x} \cdot \frac{\Delta_y^2 C}{\Delta y^2}. \quad (9.18)$$

У цьому випадку розрахункова область розбивається сіткою на прямокутники (рис. 9.1) зі сторонами Δx і Δy . Як і у випадку просторового завдання, кожен прямокутник вздовж осі x має нумерацію 1, 2, ..., $k-1$, k , $k+1$; $k+2$ і т. д.; а вздовж осі y через 1, 2, ..., $n-1$, n , $n+1$, $n+2$ і т. д.

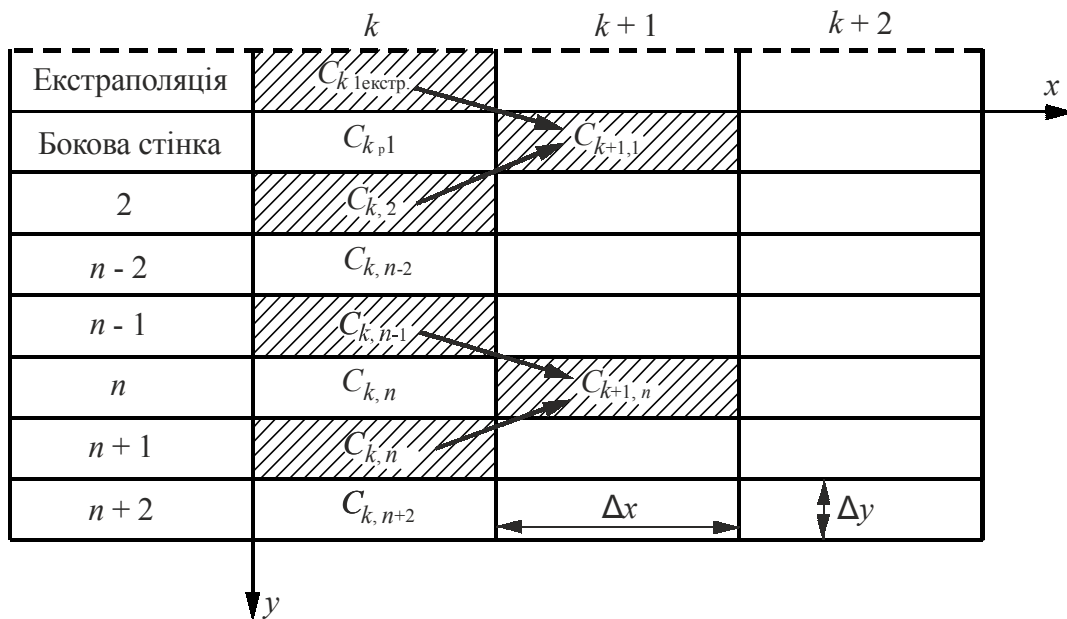


Рис. 9.1. Сітка для розрахунку концентрації забруднюючих речовин за умов плоского завдання

При виконанні розрахунків на плані водного об'єкта позначають місце випуску стічних вод у водний об'єкт (початковий створ). Нижче за течією потік ділиться на розрахункові елементи. Швидкість випуску стічних вод у водний об'єкт у місці скиду $v_{ст}$ приймається рівною швидкості течії водотоку $v_{в}$. Умовна площа поперечного перерізу струменя у місці скиду у водний об'єкт визначається за формулою

$$\delta = \frac{q_{ст}}{v_{сер}}. \quad (9.19)$$

При розв'язанні плоского завдання та розрахунках розподілу концентрації забруднюючої речовини наступним етапом є визначення ширини забрудненого струменя у початковому створі

$$b = \frac{\delta}{H_{в}} = \frac{q_{ст}}{H_{в} \cdot v_{сер}}. \quad (9.20)$$

Допустиму ширину розрахункового прямокутника Δy визначають за формулами:

при скиді стічних вод біля берега

$$\Delta y = b = \frac{\delta}{H_{в}} = \frac{q_{ст}}{H_{в} \cdot v_{сер}}; \quad (9.21)$$

при випусках стічних вод на відстані від берега або на середині потоку

$$\Delta y = \frac{b}{2} = \frac{q_{ст}}{2 \cdot H_{в} \cdot v_{сер}}. \quad (9.22)$$

У випадку, коли ширина розрахункового елемента дуже велика ($\Delta y > 0,1B$), то її значення зменшують з урахуванням вимоги $\Delta y \leq 0,1 B$.

При цьому значення Δx , Δy пов'язані залежністю

$$\Delta x = \frac{v_{сер} \cdot \Delta y^2}{2 \cdot D}. \quad (9.23)$$

Кількість прямокутників по ширині водотоку, зайнятих забрудненою водою в результаті випуску стічних вод та загальну кількість прямокутників по ширині водотоку визначають за формулами

$$n = \frac{b}{\Delta y}, \quad (9.24)$$

$$n_{заг} = \frac{B}{\Delta y}. \quad (9.25)$$

Концентрація речовини у розрахунковому прямокутнику під номером k, n визначатиметься за формулою

$$C_{k+1,n} = \frac{1}{2} \cdot (C_{k,n-1} + C_{k,n+1}). \quad (9.26)$$

Якщо у скидах стічних вод міститься не одна, а декілька речовин, кількість яких може доходити до декількох десятків, розрахунок виконується для кожної речовини окремо.

Приклад 9.1. Визначити максимальну концентрацію забруднюючої речовини у водотоці на відстані 700 м від місця випуску стічних вод за схемою плоского завдання. Випуск стічних вод – береговий. Вихід стічних вод $q_{\text{ст}} = 50,6 \text{ м}^3/\text{с}$. Водотік характеризується слідуючими показниками:

- середня швидкість течії $v_{\text{сер}} = 2,42 \text{ м/с}$;
- середня глибина водотока $H_{\text{сер}} = 2,37 \text{ м}$;
- ширина водотока $B = 26,5 \text{ м}$.

Коефіцієнт турбулентної дифузії $D = 0,073 \text{ м}^2/\text{с}$. Для спрощення розрахунків приймаємо, що фонове забруднення водотоку відсутнє, тобто $C_{\text{ф}} = 0$, а концентрація забруднюючої речовини у стічній воді $C_{\text{ст}} = 100 \text{ г/м}^3$.

Розв'язок

1. За формулою (9.19) визначаємо початковий переріз струменя:

$$\delta = \frac{50,6}{2,42} = 20,9 \text{ м}^2.$$

2. Ширину забрудненої частини водотоку визначаємо за формулою (9.20):

$$b = \frac{\delta}{H_{\text{сер}}} = \frac{20,9}{2,37} = 8,8 \text{ м}.$$

3. Ширину розрахункового прямокутника визначаємо за формулою (9.21). Оскільки ширина розрахункового елемента дуже велика і не виконується умова $\Delta y \leq \frac{1}{10} \cdot B$, приймаємо $\Delta y = 1,3 \text{ м}$.

4. За формулою (9.26) визначаємо кількість прямокутників по ширині водотоку, зайнятих забрудненою водою в результаті випуску стічних вод

$$n = \frac{8,8}{1,3} = 7.$$

5. Загальну кількість прямокутників по ширині водотоку визначаємо за формулою (9.24):

$$n_{\text{заг}} = \frac{26,5}{1,3} = 20.$$

6. За формулою (9.23) визначаємо відстань між розрахунковими перерізами по довжині водотоку:

$$\Delta x = \frac{2,42 \cdot 1,69}{2 \cdot 0,073} = 28 \text{ м}.$$

7. Будуємо переріз водотоку, а за формулою (9.26) визначаємо значення концентрації забруднюючої речовини по довжині та ширині водотоку. Розраховані значення заносимо до таблиці 9.1.

8. Оскільки ділянка водотоку, що досліджується, велика, а розміри прямокутників малі, то розрахунки проводимо до 14 створу, після чого клітки у перерізі об'єднуємо (укрупнюємо), отримуючи нові середні значення концентрації забруднюючої речовини і нові лінійні параметри прямокутників. Значення концентрацій забруднюючої речовини отримуємо як середнє арифметичне з суми концентрацій об'єднаних прямокутників.

Таблиця 9.1. Поширення забруднюючої речовини по довжині та ширині водотоку у випадку берегового скиду стічних вод

													0	0	1	Після збільшення Δz = 2,6 м; Δy = 112 м.			
												0	1	1	2				
										0	1	1	1	2	3				
						0	1	1	3	2	4	3	6	6					
					0	3	2	7	4	9	6	12	8	13	13				
		0	12	6	19	11	23	15	26	18	27	20	28	28		1	2	2	3
	0	50	25	50	32	50	35	50	37	50	38	50	39	49	49	2	2	3	4
100	50	75	50	69	51	66	50	63	50	62	50	61	50			3	4	5	7
100	100	75	87	69	81	66	77	63	74	62	72	61	70	70		6	8	10	13
100	100	100	88	93	82	88	77	85	74	82	72	79	70			12	17	20	21
100	100	100	100	94	96	89	93	85	90	82	87	79	85	85		28	31	33	34
100	100	100	100	100	97	98	93	96	90	93	87	91	85			49	49	49	49
100	100	100	100	100	100	98	99	96	97	93	95	91	93	93		70	67	65	63
100	100	100	100	100	100	99	99	99	97	97	95	95	93			85	81	78	75
100	100	100	100	100	100	100	100	99	99	97	97	95	95	93		93	89	85	81
C	100	100	100	100	100	100	100	99	99	97	97	95	95	93		93	89	85	81
x	0	28	56	84	112	140	168	196	224	252	280	308	336	364		364	476	588	700

Приклад 9.2. У річці на відстані 11 м від берега встановлено зосереджувальний випуск стічних вод. Розрахунковий вихід стічних вод на випуску $q_{ст} = 0,8$ м³/с, концентрація забруднюючих речовин $C_{ст} = 120$ мг/л. Водотік характеризується наступними показниками:

- середня швидкість течії $v_{сер} = 0,2$ м/с;
- середня глибина водотоку $H_{сер} = 1,8$ м;
- ширина водотоку $B = 70$ м.

Коефіцієнт турбулентної дифузії $D = 0,0028$ м²/с. Встановити кратність розбавлення на відстані 500 м від випуску. Побудувати переріз водотоку, визначити концентрацію забруднюючої речовини по довжині та ширині водотоку.

Розв'язок

1. За формулою (9.22) визначаємо поперечний розмір початкового прямокутника для руслового випуску стічних вод:

$$\Delta y = \frac{0,8}{2 \cdot 1,8 \cdot 0,2} = 1,11 \text{ м.}$$

2. За формулою (9.23) визначаємо відстань між розрахунковими перерізами по довжині водотоку:

$$\Delta x = \frac{0,2 \cdot 1,11^2}{2 \cdot 0,0028} = 44 \text{ м.}$$

3. Далі готуємо сітку для розрахунків, де по горизонталі позначаємо відстань від перерізу випуску в метрах, а по вертикалі – номери прямокутників. Згідно прийнятого кроку Δy , випуск буде розміщено у 10-ому і 11-ому прямокутнику, оскільки $11/1,11 \approx 10$. У ці прямокутники заносимо значення концентрації забруднювача у стічних водах на випуску, а в ті, що залишились – нулі (фонові концентрації). Для наступних розрізів концентрацію розраховуємо за формулою (9.26). Результати розрахунків заносимо до таблиці 9.2.

Таблиця 9.2. Поширення забруднюючої речовини у водотоці у випадку скиду стічних вод на відстані від берега

№ клітинки	Концентрація, мг/л при x, м													
	0	43,8	87,6	131,4	175,2	219	262,8	306,6	350,4	394,2	438	481,8	525,6	
-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,7	0,7	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0,7	0,7	
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,25	1,2	0,7	2,0	
3	0	0	0	0	0	0	0	1,0	0,5	2,2	1,2	3,3	2,0	
4	0	0	0	0	0	0	1,9	1,0	3,8	2,2	5,4	3,3	6,5	
5	0	0	0	0	0	3,8	1,9	6,6	3,8	8,5	5,4	9,7	6,5	
6	0	0	0	0	7,5	3,8	11,3	6,6	13,2	8,5	14,0	9,7	14,4	
7	0	0	0	15	7,5	18,8	11,3	19,8	13,2	19,6	14,0	19,2	14,4	
8	0	0	30	15	30	18,8	28,2	19,8	26,1	19,6	24,4	19,2	18,0	
9	0	60	30	45	30	37,5	28,2	32,4	26,1	29,2	24,4	26,8	18,0	
10	120	60	60	45	45	37,5	37,5	32,4	32,4	29,2	29,2	26,8	26,8	
11	120	60	60	45	45	37,5	37,5	32,4	32,4	29,2	29,2	26,8	26,8	
12	0	60	30	45	30	37,5	28,2	32,4	26,1	29,2	24,4	26,8	18,0	
13	0	0	30	15	30	18,8	28,2	19,8	26,1	19,6	24,4	19,2	18,0	
14	0	0	0	15	7,5	18,8	11,3	19,8	13,2	19,6	14,0	19,2	14,4	
15	0	0	0	0	7,5	3,8	11,3	6,6	13,2	8,5	14,0	9,7	14,4	
16	0	0	0	0	0	3,8	1,9	6,6	3,8	8,5	5,4	9,7	6,5	
17	0	0	0	0	0	0	1,9	1,0	3,8	2,2	5,4	3,3	6,5	
18	0	0	0	0	0	0	0	1,0	0,5	2,2	1,2	3,3	2,0	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,25	1,2	0,66	2,0	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,12	0,66	0,33	
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,12	0,66	0,33	
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,66	0,03	
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03	
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

За даними таблиці у розрахунковому створі знаходимо максимальне значення концентрації забруднюючої речовини $C_{\text{ств}} = 26,8$ мг/л, що дає можливість розрахувати основне розбавлення

$$n = \frac{120 + 0}{26,8 - 0} = 4,48, \text{ яке буде і загальним розбавленням.}$$

Практична робота № 10

Розрахунок розбавлення стічних вод у озерах та водосховищах

При скиді стічних вод у водосховища та проточні озера внаслідок слабких постійних течій слабо розбавлені стічні води віддаляються від місця випуску значно повільніше, ніж при скиді у річки. Вітрові течії, що виникають час від часу можуть відносити забруднення у будь-який бік. Це призводить до швидкого зниження ступеню забруднення на початковій стадії, проте, повна ліквідація його відбувається на дуже великих відстанях від місця випуску. Тому на відстані декількох кілометрів може зберігатися висока концентрація шкідливих домішок. На місце води, що зноситься вітром, з глибини або з сусідніх ділянок озера або водосховища рухаються водні течії у напрямку, протилежному поверхневому – компенсаційні або градієнтні течії. При сильно витягнутих в одному напрямі озерах та водосховищах та при малій зміні глибин у поверхневому шарі, що складає приблизно 0,4 глибини, течія має однаковий з вітром напрям. Нижче цієї глибини знаходиться шар води, що має протилежний вітру напрямок течії.

Для опису поширення стічних вод у водосховищах і озерах в умовах, переважно, вітрової течії М.А. Руффелем розроблено метод розв'язання диференціального рівняння (8.1). Було розглянуто два варіанти: випуск стічних вод біля берега, струмінь забрудненої води рухається вздовж берега (напрямок вітру паралельний берегу); випуск стічних вод у глибині водосховища, струмінь забрудненої води рухається від випуску до берега (напрямок вітру перпендикулярний берегу).

При розробці своїх формул М.А. Руффель використав розв'язання А.В. Караушева для просторової задачі. При цьому для вибору величини Δz М.А. Руффель розглянув два варіанта: $\Delta z = H/5$ та $\Delta z = H/3$, тобто при кількості клітинок за вертикаллю 5 та 3. Тоді при $m = 3$, $\Delta z = H/3$ та при $\Delta y = \Delta z$, то площа перерізу однієї клітини $f = \Delta y \cdot \Delta z = H^2/9$.

М.А. Руффелем експериментально встановлено, що при швидкості вітру $w = 5,5$ м/с швидкість течії поверхневого шару води в озері або водосховищі складає $v_{\text{ш}} = 0,2$ м/с, а середня швидкість течії $v_{\text{сер}}$ для водойм глибиною від 3 до 15 м складає:

для верхньої третини глибини – 0,106 м/с;
 для середньої третини глибини – 0,028 м/с;
 для нижньої третини глибини – 0,078 м/с (знак «мінус» вказує на протилежний поверхневий напрям течії).

Згідно з методом М.А. Руффеля повне розбавлення стічних вод у озерах або водосховищах складатиме

$$n = n_{\Pi} \cdot n_o, \quad (10.1)$$

де n_{Π} – початкове розбавлення стічних вод, що виникає внаслідок підсмоктування деякої додаткової кількості стічних вод до паралелепіпедів початкового перерізу; n_o – основне розбавлення стічних вод.

Розглянемо матеріальний баланс забруднюючих речовин для початкового паралелепіпеда. Балансове рівняння має вигляд:

$$q_{\text{ст}} \cdot \Delta C_{\text{ст}} + (H^2 / 9) \cdot v_{\text{сер}} \cdot \Delta C_{\text{в}} = [q_{\text{ст}} + (H^2 / 9) \cdot v_{\text{сер}}] \cdot \Delta C_{\Pi}, \quad (10.2)$$

де $\Delta C_{\text{ст}}$, $\Delta C_{\text{в}}$, ΔC_{Π} , – перевищення фонових концентрацій відповідно у стічній воді, у циркуляційному потоці, що зумовлений наявністю двох напрямів течії внаслідок вітрового впливу, а також на виході.

М.А. Руффель прийняв величину $\Delta C_{\text{в}}$, пропорційною $\Delta C_{\text{ст}}$:

$$\Delta C_{\text{в}} = r \cdot \Delta C_{\text{ст}}. \quad (10.3)$$

Значення коефіцієнту пропорційності r залежить від місця випуску стічних вод: при випуску у верхню третину товщі води або в прибережну мілководну частину озера або водосховища $r = 0,1$; при випуску стічних вод у нижню третину глибини $r = 0,05$. Для незарегульованих ручищ або для верхових стокових ділянок водосховищ $r = 0$.

Підставляючи залежність (10.3) у рівняння (10.2), після деяких перетворень отримаємо:

$$n_{\Pi} = \Delta C_{\text{ст}} / \Delta C_{\Pi} = (q + 0,111 \cdot v_{\text{сер}} \cdot H^2) / (q + 0,111 \cdot r \cdot v_{\text{сер}} \cdot H^2). \quad (10.4)$$

З урахуванням приведених значень $v_{\text{сер}}$ та r (відповідно 0,106 м/с та 0,1 для верхньої третини глибини та 0,078 м/с та 0,05 для нижньої третини глибини) М.А. Руффель отримав наступні формули для початкового розбавлення [1]:

при випуску стічних вод на мілководді або у верхню третину глибини

$$n_{\Pi} = (q + 0,0118 \cdot H^2) / (q + 0,00118 \cdot H^2); \quad (10.5)$$

при випуску стічних вод у нижню третину глибини

$$n_{\Pi} = (q + 0,0087 \cdot H^2) / (q + 0,000435 \cdot H^2). \quad (10.6)$$

Випуск стічних вод у середню третину глибини не рекомендується, оскільки швидкість течії в ній близька до нуля, що може створити область стійкого забруднення водоймища.

При швидкості вітру, що відрізняється від 5,5 м/с, величину $v_{\text{сер}}$ необхідно помножити на співвідношення $w/5,5$. Тоді формули для початкового розбавлення для будь-якої швидкості вітру приймуть вигляд:

при випуску стічних вод на мілководді або у верхню третину глибини

$$n_{\text{п}} = (q + 0,00215 \cdot w \cdot H^2) / (q + 0,000215 \cdot w \cdot H^2); \quad (10.7)$$

при випуску стічних вод у нижню третину глибини

$$n_{\text{п}} = (q + 0,000158 \cdot w \cdot H^2) / (q + 0,000079 \cdot w \cdot H^2). \quad (10.8)$$

Основне розбавлення n_o , визначається за наступними залежностями:

при випуску стічних вод біля берега або у верхню третину глибини

$$n_o = 1 + 0,412 \cdot (L / \Delta x)^{0,627+0,0002(L / \Delta x)}; \quad (10.9)$$

при випуску стічних вод у нижню третину глибини озера або водосховища

$$n_o = 1,86 + 2,32 \cdot (L / \Delta x)^{0,41+0,0064(L / \Delta x)}, \quad (10.10)$$

де L – відстань від випуску до розрахункового створу, Δx – відстань між розрахунковими перерізами.

Значення Δx визначається за наступними формулами:

при випуску стічних вод на мілководді або у верхню третину глибини

$$\Delta x = 6,53 \cdot H^{1,167}; \quad (10.11)$$

при випуску стічних вод у нижню третину глибини

$$\Delta x = 4,41 \cdot H^{1,167}. \quad (10.12)$$

Емпіричні формули М.А. Руффеля мають обмежене використання. Так при поширенні забрудненого струменя вздовж берега вони можуть застосовуватися для відстаней до 20 км від випуску до контрольного пункту. При випуску стічних вод, що рухаються до берегу, у нижню третину глибини формули справедливі для випусків, віднесених від берега вглиб озера або водосховища не далі чим на 500 м. Залежності М.А. Руффеля не прийнятні також для зимового підкригового режиму.

Тому М.М. Лапшевим був розроблений метод розрахунків глибинних випусків у озера та водосховища будь-яких розмірів, що базується на рівняннях турбулентного змішування затоплених струменів з урахуванням гідрологічних

особливостей водоймища, а також розташування випуску в плані та по глибині.

Метод розрахунку розбавлення стічних вод в озерах і водосховищах М.М. Лапшева може бути застосований за наступних умов [3]:

- абсолютна швидкість витікання струменя з випуску $v_{ст}$ повинна бути не меншою ніж 2 м/с,

- випуск стічних вод розміщується на деякому віддаленні від берега і відношення глибини у місці випуску H до діаметра випускного отвору d_o повинно бути більшим за 30.

Найменше розбавлення на відстані L від місця випуску стічних вод (з урахуванням початкового розбавлення) визначається за формулою

$$n_L = A \cdot \left(\frac{0,2 \cdot L}{d_o} \right)^{P \cdot S}, \quad (10.13)$$

де A – параметр, що характеризує зміну розбавлення при застосуванні різних конструкцій випуску стічних вод; P – параметр, що залежить від ступеню проточності водойми і навантаження на неї стічних вод; S – параметр, що залежить від відносної глибини водойми.

У випадку зосередженого випуску $A = 1$, при розосередженому визначається за формулою

$$A = 0,74 \cdot \left(\frac{L}{l_o} + 2,1 \right)^{-0,4}, \quad (10.14)$$

де l_o – відстань між оголовками випуску.

Параметр P у випадку, коли рух води у водоймі визначається стоком, розраховують за формулою

$$P = \frac{L_b \cdot \omega_o}{0,000015 \cdot \beta_b \cdot W_o + L_b \cdot \omega_o}, \quad (10.15)$$

де L_b – довжина водойми від місця випуску стічних вод у напрямку стокової течії, м; ω_o – сумарна площа випускних отворів, м²; β_b – період обміну води у водоймі, роки; W_o – об'єм скиду стічних вод протягом року, м³/рік;

У випадку коли течія у водоймі (озері чи водосховищі) визначається вітрами або швидкість стокових течій відома, значення P можна визначити за формулою

$$P = \frac{v_{сер}}{0,000015 \cdot v_{ст} + v_{сер}}, \quad (10.16)$$

де $v_{ст}$ – швидкість витікання стічної води у водойму, м/с; $v_{сер}$ – швидкість течії річки, м/с.

Значення параметра S в залежності від глибини у районі випуску визначають за формулою

$$S = 0,875 + \frac{0,325 \cdot H_{\text{сер}}}{360 + \left(\frac{v_{\text{сер}}}{v_{\text{ст}}} \right) \cdot 10^5}, \quad (10.17)$$

де $H_{\text{сер}}$ – глибина водойми у місці випуску стічних вод, м. Параметр S завжди не повинен перевищувати одиницю ($S \leq 1$), якщо ж його розрахункове значення є більшим, то S приймають рівним одиниці.

Приклад 10.1. Визначити розбавлення стічних вод для зосередженого випуску у водосховище. Середня глибина у місці встановленого випуску стічних вод $H_{\text{сер}} = 14$ м, розрахунковий вихід стічних вод $q_{\text{ст}} = 0,33$ м³/с. Швидкість вітру над водосховищем $w = 5,5$ м/с. Розрахунковий створ не далі 500 метрів від місця випуску стічних вод.

Розв'язок

1. За формулою (10.6) визначаємо початкове розбавлення стічних вод при випуску стічних вод у нижню третину глибини

$$n_{\text{п}} = \frac{0,33 + 0,0087 \cdot 15^2}{0,33 + 0,000435 \cdot 15^2} = \frac{2,2875}{0,4279} = 5,35.$$

2. Відстань між розрахунковими перерізами при випуску стічних вод у нижню третину глибини визначаємо за формулою (10.12)

$$\Delta x = 4,41 \cdot 14^{1,167} = 95,93 \approx 96 \text{ м}.$$

3. Основне розбавлення, визначаємо за формулою (10.10)

$$n_0 = 1,86 + 2,32 \cdot (500/96)^{0,41+0,0064(500/96)} = 6,68.$$

4. Повне розбавлення стічних вод у водосховищі за формулою (10.1) складатиме

$$n = 5,35 \cdot 6,68 = 35,74.$$

Приклад 10.2. Визначити розбавлення стічних вод для глибинного зосередженого випуску у проточну водойму, якщо швидкість течії у водоймі $v_{\text{сер}} = 0,021$ м/с, середня глибина у місці встановленого випуску стічних вод $H_{\text{сер}} = 30$ м, розрахунковий вихід стічних вод $q_{\text{ст}} = 0,33$ м³/с. Водойма відноситься до водних об'єктів рибогосподарського водокористування другої категорії, тобто розрахунковий створ не далі 500 метрів від місця випуску стічних вод.

Розв'язок

1. Оскільки випуск стічних вод здійснюється через зосереджений випуск, то параметр, що характеризує зміну розбавлення при застосуванні різних конструкцій випуску стічних вод $A = 1$.

2. Визначаємо діаметр випускного отвору, приймаючи, що швидкість витікання стічної води у водойму $v_{\text{ст}} = 2,5$ м/с

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{\text{ст}}}{\pi \cdot v_{\text{ст}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,33}{3,14 \cdot 2,5}} = 0,405 \text{ м}.$$

Вибираємо стандартний діаметр випуска $d'_0 = 0,4$ м, при якому фактична швидкість витікання буде $v'_{\text{ст}} = 2,53$ м/с

3. За формулою (10.16) визначаємо параметр, що залежить від швидкості проточності водойми і навантаження на неї стічних вод

$$P = \frac{0,021}{0,000015 \cdot 2,53 + 0,021} = 0,995.$$

4. В залежності від глибини водойми в районі випуску за формулою (10.17) визначаємо значення параметра S

$$S = 0,875 + \frac{0,325 \cdot 30}{360 + \left(\frac{0,021}{2,53} \right) \cdot 10^5} = 0,882.$$

5. Найменше розбавлення на відстані 500 м від місця випуску стічних вод визначаємо за формулою (10.13):

$$n_L = 1 \cdot \left(\frac{0,2 \cdot 500}{0,4} \right)^{0,995 \cdot 0,882} = 125.$$

Практична робота № 11

Розрахунок кратності розбавлення стічних вод у морі

Для розрахунку кратностей початкового та основного розбавлення стічних вод спочатку необхідно визначити характерну мінімальну швидкість течії морської води u_m , м/с, що відповідає 95 % забезпеченості у зоні розбавлення стічних вод у лімітуючий сезон року або у період найбільш інтенсивного водокористування. Величина u_m визначається за даними натурних спостережень гідрометеослужби за швидкістю морських течій у зоні розбавлення стічних вод.

За відсутності таких даних величина u_m розраховується наступним способом.

Якщо виконуються умови

$$2,0 \leq V \leq 20 \text{ (м/с)}, 1,5 \leq H \leq 50 \text{ (м)}, \quad (11.1)$$

де V – швидкість вітру 95% забезпеченості у шарі атмосфери біля поверхні води (м/с), то величина u_m розраховується за формулою [12, 13]

$$u_m = a_0 + a_1 \cdot V + a_2 \cdot H + a_3 \cdot V^2 + a_4 \cdot H^2 + \\ + a_5 \cdot V \cdot H + a_6 \cdot V^2 \cdot H + a_7 \cdot V \cdot H^2, \quad (11.2)$$

де a_i ($i = 1, 2, \dots, 7$) – коефіцієнти, що наведені у табл. 11.1.

Таблиця 11.1. Значення коефіцієнтів a_i , c_i в залежності від швидкості вітру V

$V \leq 6$ м/с		$V > 6$ м/с	
a_i	c_i	a_i	c_i
$3,613 \cdot 10^{-2}$	$5,994 \cdot 10^{-4}$	$-2,909 \cdot 10^{-2}$	$4,430 \cdot 10^{-2}$
$-2,751 \cdot 10^{-3}$	$5,347 \cdot 10^{-4}$	$2,661 \cdot 10^{-2}$	$-1,029 \cdot 10^{-2}$
$1,108 \cdot 10^{-2}$	$-3,681 \cdot 10^{-4}$	$-2,913 \cdot 10^{-3}$	$1,296 \cdot 10^{-4}$
$1,461 \cdot 10^{-3}$	$-1,469 \cdot 10^{-4}$	$3,408 \cdot 10^{-4}$	$5,905 \cdot 10^{-4}$
$9,729 \cdot 10^{-6}$	$5,669 \cdot 10^{-6}$	$1,235 \cdot 10^{-4}$	$-3,024 \cdot 10^{-4}$
$-7,189 \cdot 10^{-3}$	$1,426 \cdot 10^{-4}$	$-5,896 \cdot 10^{-4}$	$1,608 \cdot 10^{-4}$
$9,925 \cdot 10^{-4}$	$2,276 \cdot 10^{-6}$	$2,949 \cdot 10^{-6}$	$-1,160 \cdot 10^{-6}$
$-3,875 \cdot 10^{-6}$	$-2,401 \cdot 10^{-6}$	$-4,070 \cdot 10^{-7}$	$3,057 \cdot 10^{-6}$

Якщо хоча б одна із умов (13.1) не виконується, то величина u_m розраховується за формулою

$$u_m = 0,015 \cdot V. \quad (11.3)$$

У випадку, якщо річний обсяг скиду стічних вод перевищує 10 млн. м³ за рік, берегова лінія поблизу випуску стічних вод суттєво відрізняється від прямої (затока, мис, тощо) та у зоні розбавлення стічних вод спостерігається суттєва стратифікація морської води за густиною, то величину u_m слід розраховувати чисельними методами з використанням апробованих математичних моделей формування стоково-вітрових течій у водоймах [14–16].

Для розрахунку кратності початкового розбавлення стічних вод спочатку визначається швидкість $v_{ст}$ (м/с) витікання стічної води у море із затопленого випуску стічних вод або із випуску з вільною поверхнею води (канава, лоток, тощо).

Якщо випуск затоплений, то

$$v_{ст} = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot d_o^2 \cdot N_o}, \quad (11.4)$$

де q – секундна витрата стічних вод, м³/с; d_o – діаметр випускного отвору, м; N_o – кількість випускних отворів (для зосередженого випуску $N_o = 1$, а для розосередженого – $N_o > 1$).

Для випуску із вільною поверхнею води величина $v_{ст}$ приймається за даними її вимірювань при заданій витраті q стічних вод та розраховується еквівалентний діаметр d_o випускного отвору:

$$d_o = \sqrt{\frac{4 \cdot q}{\pi \cdot v_{ст}}}. \quad (11.5)$$

Якщо густина стічних вод суттєво відрізняється від густини морської води, процес перемішування значною мірою визначається силами плавучості, вплив яких враховується числом Фруда Fr [6]:

$$Fr = v_{\text{ст}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{м}}}{g \cdot d_o \cdot |\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{ст}}|}}, \quad (11.6)$$

де $\rho_{\text{м}}$ – середня (по глибині моря) густина морської води у зоні розбавлення стічних вод, т/м^3 ; $\rho_{\text{ст}}$ – густина стічної води, т/м^3 .

Для визначення кратності розбавлення стічних вод на початковій ділянці необхідно знати відстань (по вертикалі) від випуску до поверхні моря $H_{\text{в}}$.

Якщо ж $\rho_{\text{ст}} < \rho_{\text{м}}$ і випуск стічних вод – затоплений, то визначається висота $H_{\text{з}}$ (м) затопленого струменю стічних вод над випуском [7]:

$$H_{\text{з}} = 8,92 \cdot (1 - 0,93 \cdot u_{\text{м}}^{0,4}) \left[\frac{q \cdot (\sigma_{\text{г}} - \sigma_{\text{ст}}) / N_o}{\sqrt{g} \cdot [(\sigma_{\text{г}} - \sigma_{\text{п}}) / H_{\text{в}}]^{1,5}} \right]^{0,25}, \quad (11.7)$$

де $\sigma_{\text{г}} = (\rho_{\text{г}} - 1) \cdot 10^3$, $\sigma_{\text{п}} = (\rho_{\text{п}} - 1) \cdot 10^3$, $\sigma_{\text{ст}} = (\rho_{\text{ст}} - 1) \cdot 10^3$, $\rho_{\text{г}}$, $\rho_{\text{п}}$ – відповідно густини морської води на глибині випуску і на поверхні моря, т/м^3 ; $u_{\text{м}}$ – характерна мінімальна швидкість течії морської води у зоні розбавлення стічних вод (м/с).

Якщо стічна вода легша за морську ($\rho_{\text{ст}} < \rho_{\text{м}}$) і виконується умова

$$Fr \leq \frac{1,12 \cdot H_{\text{в}}}{d_o}, \quad (11.8)$$

то кратність початкового розбавлення $n_{\text{п}}$ розраховується за формулою [7]

$$n_{\text{п}} = 0,54 Fr \cdot \left(\frac{0,38 \cdot H_{\text{в}}}{d_o \cdot Fr} + 0,66 \right)^{1,67}. \quad (11.9)$$

Відстань $l_{\text{п}}$ (м) між випуском стічних вод і граничним створом зони початкового розбавлення у цьому випадку приймається рівною $H_{\text{в}}$.

Якщо $H_{\text{з}} < H_{\text{в}}$, то у формули (11.8), (11.9) замість величини $H_{\text{в}}$ слід підставити величину $H_{\text{з}}$.

Якщо стічна вода важча за морську ($\rho_{\text{ст}} > \rho_{\text{м}}$) і виконується умова

$$Fr \leq \frac{0,434 \cdot H_{\text{в}}}{d_o \cdot (\sin \varphi)^{1,5}}, \quad (11.10)$$

де φ – кут між напрямком витікання води із випуску стічних вод і довільною горизонтальною площиною,

то кратність початкового розбавлення n_{Π} розраховується за формулою [6]

$$n_{\Pi} = 0,524 Fr \cdot (\sin \varphi)^{1/2} (1 - 0,06316 \sin^2 \varphi - 0,1583 \sin^4 \varphi). \quad (11.11)$$

Відстань l_{Π} (м) між випуском стічних вод і граничним створом зони початкового розбавлення у цьому випадку визначається за формулою

$$l_{\Pi} = 5,36 \cos \varphi \cdot \sqrt{\sin \varphi \cdot Fr \cdot d_o}; \quad (11.12)$$

Якщо не виконується хоча б одна з умов (11.8), або хоча б одна з умов (11.10), то кратність початкового розбавлення n_{Π} розраховується у такий спосіб [3].

У випадку, коли не виконується хоча б одна з умов

$$v_{\text{CT}} > 2 \text{ м/с}, \quad (11.13)$$

$$v_{\text{CT}} \geq 4 u_{\text{M}}, \quad (11.14)$$

приймається, що $n_{\Pi} = 1$.

Якщо умови (11.12), (11.13) виконуються, то для розрахунку кратності початкового розбавлення спочатку обчислюються величини

$$\Delta v = 0,15 (v_{\text{CT}} - u_{\text{M}}), \quad (11.15)$$

$$m = u_{\text{M}} / v_{\text{CT}}. \quad (11.16)$$

Далі обчислюється діаметр d (м) забрудненої плями у граничному створі зони початкового розбавлення:

$$d = \frac{1,972 d_o}{\sqrt{(1-m) \cdot \Delta v^2 / 1,92 + m \cdot \Delta v}}. \quad (11.17)$$

Якщо $d > H$, де H – середня глибина моря у зоні розбавлення стічних вод (м), то покладаємо $d = H$.

Відстань l_{Π} (м) між випуском стічних вод і граничним створом зони початкового розбавлення розраховується за формулою

$$l_{\Pi} = \frac{d - d_o}{0,48 \cdot (1 - 3,12 m)}. \quad (11.18)$$

Якщо $l > l_{\Pi}$, де l – відстань від випуску стічних вод до контрольного створу (м), то кратність початкового розбавлення n_{Π} розраховується так:

$$n_{\Pi} = \frac{0,248 \cdot \bar{d}^2}{1 - m} \cdot \left(\sqrt{m^2 + \frac{8,1 \cdot (1 - m)}{\bar{d}^2}} - m \right), \quad (11.19)$$

де $\bar{d} = d / d_o$.

Якщо виконуються умови

$$N_o > 1, l_1 < d, \quad (11.20)$$

де l_1 – відстань між випускними отворами оголовка розосередженого випуску (м), то для розрахунку кратності початкового розбавлення n_{Π} :

- обчислюється величина

$$n_{\Pi 1} = \frac{n_{\Pi}}{\sqrt{N_o}}; \quad (11.21)$$

- за формулою (11.18) при $d = l_1$ знаходиться величина $n_{\Pi} = n_{\Pi 2}$;

- приймається, що $n_{\Pi} = \max(n_{\Pi 1}, n_{\Pi 2})$.

Якщо за наведеними вище формулами одержимо, що $n_{\Pi} < 1$, то приймаємо $n_{\Pi} = 1$.

Якщо $l = l_{\Pi}$, то $n_{\Pi} = \max(0,428 n_{\Pi 1})$.

Якщо $l < l_{\Pi}$, то $n_{\Pi} = 1$.

Якщо у зоні розбавлення стічних вод спостерігається суттєво нелінійна стратифікація потоку морської води, то кратність початкового розбавлення n_{Π} розраховується чисельними методами з використанням апробованих математичних моделей, які описують розподіл концентрації забруднюючої речовини у стратифікованому потоці [8, 9].

Розрахунок кратності основного розбавлення n_o стічних вод у контрольному створі для зосередженого випуску, який віддалений від інших випусків на відстань не менш ніж на 5 км проводиться з використанням аналітичного розв'язання рівняння турбулентної дифузії. Особливістю прибережної зони моря у порівнянні з водоймищами є анізотропія коефіцієнтів турбулентної дифузії: коефіцієнт горизонтальної дифузії D_{Γ} , як правило суттєво перевищує коефіцієнт вертикальної дифузії D_v . Визначення цих коефіцієнтів здійснюється за формулами [6, 12, 13]:

$$D_v = c_0 + c_1 V + c_2 H + c_3 V^2 + c_4 H^2 + c_5 V H + c_6 V^2 H + c_7 V H^2, \quad (11.22)$$

де c_i ($i = 1, 2, \dots, 7$) – коефіцієнти, які наведені у таблиці 13.1.

$$D_{\Gamma} = 0,032 + 21,8 \cdot u_m^2. \quad (11.23)$$

Здатність забруднюючих речовин до перетворення у морському середовищі враховується коефіцієнтом неконсервативності k , 1/добу.

Для консервативних речовин $k = 0$, а для неконсервативних – величина k розраховується за формулами [6]:

$$k = \alpha \cdot k_{20} \cdot k_T, \quad (11.24)$$

$$\alpha = \begin{cases} 5, & \text{якщо } u_M \geq 0,2 \text{ м/с} \\ 5 - 4 \exp[-u_M(7 + 80 \cdot u_M)], & \text{якщо } u_M < 0,2 \text{ м/с} \end{cases}, \quad (11.25)$$

$$k_T = 0,0451 T + 0,101, \quad (11.26)$$

де k_{20} – коефіцієнт неконсервативності речовини у нерухомій морській воді при температурі 20° С, 1/добу; T – температура морської води, °С.

Коефіцієнт k_{20} визначається за відповідними експериментальними Даними або оцінюється за даними [11]. За відсутності таких даних приймається, що $k_{20} = 0$.

Кратність основного розбавлення n_0 стічних вод у контрольному створі розраховується за формулою [6, 10]

$$n_0 = \frac{\Phi(z_1)}{\gamma_0 \cdot z_2} \cdot \xi, \quad (11.27)$$

$$\text{де} \quad z_1 = \frac{l + x_0}{x_*}, \quad (11.28)$$

$$z_2 = \frac{q \cdot n_{\Pi}}{u_M \cdot H^2} \cdot \sqrt{\frac{D_B}{D_{\Gamma}}}, \quad (11.29)$$

$$x_* = \frac{u_M \cdot H^2}{4\pi \cdot D_B}, \quad (11.30)$$

$$x_0 = \begin{cases} z_2^2 \cdot x_* - l_{\Pi}, & \text{якщо } z_2 \geq 1 \\ z_2 \cdot x_* - l_{\Pi}, & \text{якщо } z_2 < 1 \end{cases}, \quad (11.31)$$

$$\Phi(z_1) = \begin{cases} z_1, & \text{якщо } z_1 \leq 1 \\ \sqrt{z_1}, & \text{якщо } z_1 > 1 \end{cases}, \quad (11.32)$$

$$\xi = \exp\left[\frac{k \cdot (l + x_0)}{86400 \cdot u_M}\right], \quad (11.33)$$

$$\gamma_0 = 1 + \exp\left[-\frac{u_M \cdot l_0^2}{D_{\Gamma} \cdot (l + x_0)}\right], \quad (11.34)$$

де x_* – параметр сполучення ділянки двовимірної дифузії з ділянкою тривимірної дифузії; γ_0 – параметр, що враховує вплив найближчого берега на кратність основного розбавлення (якщо течія морської води не спрямована уздовж берега, то $\gamma_0 = 1$); l_0 – відстань від випуску стічних вод до найближчого берега, м.

Якщо стійкий напрямок морської течії є перпендикулярним до осі оголовку лінійного розосередженого випуску стічних вод, то для такого випуску кратність основного розбавлення n_o розраховується за формулою [3,6]

$$n_o = \begin{cases} \xi \cdot \eta / (\eta - 2,26), & \text{якщо } \eta > 4 \\ \xi \cdot \max[2; 7,09 / (N_o \eta)], & \text{якщо } \eta \leq 4 \end{cases} \quad (11.35)$$

де
$$\eta = l_1 \cdot \sqrt{\frac{u_m}{D_r(l - l_\Pi)}} \quad (11.36)$$

Якщо стійкий напрямок морської течії спрямований уздовж осі лінійного розосередженого випуску, то

$$n_o = \left[\sum_{i=1}^{N_o} (1/n_{oi}) \right]^{-1}, \quad (11.37)$$

де n_{oi} – кратність основного розбавлення для окремого i - того випускного отвору, що розраховується за формулами (11.27) – (11.34), в яких $l = l_i$, $q = q_i$; l_i - відстань між i - м випускним отвором і контрольним створом, м; $q_i = q / N_o$ - витрата стічної води, що витікає з i - того отвору, м³/с.

У більш складних випадках, наприклад, якщо випуск стічних вод розташований на відстані менш ніж на 5 км від інших випусків, або розглядається розосереджений випуск складної конфігурації (Y - подібний, T - подібний та інші), або вісь розосередженого лінійного випуску не паралельна чи не перпендикулярна стійкому напрямку морської течії, якщо швидкість течії у зоні розбавлення стічних вод є істотно неоднорідною (скид стічних вод у затоку, у районі мису), тощо, кратність основного розбавлення n_o слід розраховувати чисельними або наближеними аналітичними методами з використанням математичних моделей течії морської води та перенесення речовин [8, 14–17].

Приклад 11.1. Встановити кратність розбавлення стічних вод у морі, якщо споруджується глибинний зосереджений випуск; секундна витрата стічних вод $q = 0,1$ м³/с, густина стічних вод $\rho_{ст} = 1000$ кг/м³, коефіцієнт неконсервативності фенолу у нерухомій морській воді при температурі 20 °С, $k_{20} = 0,38$ доба⁻¹ Передбачуване місце скиду розташоване на глибині $H = 12$ м, розрахункова швидкість течії у місці скиду стічних вод $v = 0,02$ м/с, середня (за глибиною моря) густина морської води у зоні розбавлення стічних вод $\rho_m = 1014$ кг/м³, градієнт густини за глибиною моря $\sigma = 0,03$ кг/м². Швидкість вітру біля поверхні води 5 м/с. Температура морської води $T = 16^\circ\text{C}$. Течія морської води у місці скиду стічних вод не спрямовано уздовж берега. Розрахунковий створ водокористування розташований на відстані $l = 1000$ м.

Розв'язок

1. Визначаємо діаметр випускного отвору, приймаючи, що швидкість витікання стічних вод у водойму $v_{\text{ст}} = 3$ м/с (формула 11.5):

$$d_o = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1}{3,14 \cdot 3}} = 0,207 \text{ м.}$$

Вибираємо стандартний діаметр випуску $d'_o = 0,2$ м, при якому фактична швидкість витікання буде $v_{\text{ст}} = 3,18$ м/с.

2. Визначаємо характерну мінімальну швидкість течії морської води у зоні розбавлення стічних вод u_m , м/с. Для цього перевіряємо умови 11.1. Оскільки умова 11.1. виконується $2,0 \leq V = 5 \leq 20$ (м/с), $1,5 \leq H = 12 \leq 50$ (м), то з таблиці 11.1 вибираємо коефіцієнти формули 11.2, яка набуває вигляду:

$$\begin{aligned} u_m = & 3,613 \cdot 10^{-2} - 2,751 \cdot 10^{-3} V + 1,108 \cdot 10^{-2} H + \\ & + 1,461 \cdot 10^{-3} V^2 + 9,729 \cdot 10^{-6} H^2 - 7,189 \cdot 10^{-3} VH + 9,925 \cdot 10^{-4} V^2 H - \\ & - 3,875 \cdot 10^{-6} VH^2 = 3,613 \cdot 10^{-2} - 2,751 \cdot 10^{-3} \cdot 5 + 1,108 \cdot 10^{-2} \cdot 12 + \\ & + 1,461 \cdot 10^{-3} \cdot 5^2 + 9,729 \cdot 10^{-6} \cdot 12^2 - 7,189 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 12 + \\ & + 9,925 \cdot 10^{-4} \cdot 5^2 \cdot 12 - 3,875 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 12^2 = 0,06 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

3. Визначаємо величини Δv та m (формули 11.15; 11.16):

$$\Delta v = 0,15 \cdot (3,18 - 0,06) = 0,468 \text{ м/с,}$$

$$m = \frac{0,06}{3,18} = 0,019.$$

4. Обчислюється діаметр d забрудненої плями у граничному створі зони початкового розбавлення (формула 11.17):

$$d = \frac{1,972 \cdot 0,2}{\sqrt{(1 - 0,019) \cdot 0,468^2 / 1,92 + 0,019 \cdot 0,468}} = 1,135 \text{ м.}$$

5. Відстань l_{Π} між випуском стічних вод і граничним створом зони початкового розбавлення розраховується за формулою 11.18:

$$l_{\Pi} = \frac{1,135 - 0,2}{0,48 \cdot (1 - 3,12 \cdot 0,019)} = 2,071 \text{ м.}$$

6. Для знайдених значень d_o і $v_{\text{ст}}$ при відомій густині стічних і морських вод встановимо значення числа Фруда (формула 11.6):

$$Fr = 3,18 \cdot \sqrt{\frac{1,014}{9,81 \cdot 0,2 \cdot |1,014 - 1,000|}} = 19,32.$$

7. Оскільки $\rho_{\text{ст}} = 1000 < 1014$, то для вибору розрахункової формули кратності початкового розбавлення стічних вод перевіряємо умову (11.8):

$$\frac{1,12 \cdot H_{\text{в}}}{d_o} = \frac{1,12 \cdot 12}{0,2} = 67,2 > 19,32.$$

Тому розрахунок кратності початкового розбавлення стічних вод визначаємо за формулою 11.9:

$$n_{\Pi} = 0,54 \cdot 19,32 \cdot \left(\frac{0,38 \cdot 12}{0,2 \cdot 19,32} + 0,66 \right)^{1,67} = 28,9.$$

8. Визначаємо коефіцієнт вертикальної турбулентної дифузії D_v , $\text{м}^2/\text{с}$. Для цього перевіряємо умови 11.1. Оскільки умова 11.1. виконується $2,0 \leq V = 5 \leq 20$ ($\text{м}/\text{с}$), то з таблиці 11.1 вибираємо коефіцієнти формули 11.22, яка набуває вигляду:

$$\begin{aligned} D_v = & 5,994 \cdot 10^{-4} + 5,347 \cdot 10^{-4} V - 3,681 \cdot 10^{-4} H - 1,469 \cdot 10^{-4} V^2 + 5,669 \cdot 10^{-6} H^2 + \\ & + 1,426 \cdot 10^{-4} VH + 2,276 \cdot 10^{-6} V^2 H + 2,401 \cdot 10^{-6} VH^2 = 5,994 \cdot 10^{-4} + 5,347 \cdot 10^{-4} \cdot 5 - \\ & - 3,681 \cdot 10^{-4} \cdot 12 - 1,469 \cdot 10^{-4} \cdot 5^2 + 5,669 \cdot 10^{-6} \cdot 12^2 + 1,426 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 12 + \\ & + 2,276 \cdot 10^{-6} \cdot 5^2 \cdot 12 + 2,401 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 12^2 = 0,007 \text{ м}^2/\text{с}. \end{aligned}$$

9. Визначаємо коефіцієнт горизонтальної турбулентної дифузії D_r , $\text{м}^2/\text{с}$ за формулою 11.23:

$$D_r = 0,032 + 21,8 \cdot 0,06^2 = 0,1105 \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Для визначення кратності основного розбавлення n_0 визначаємо параметри:

- параметр сполучення ділянки двовимірної дифузії з ділянкою тривимірної дифузії x_* , м за формулою 11.30:

$$x_* = \frac{0,06 \cdot 12^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,007} = 98,27 \text{ м}$$

- параметр Z_2 за формулою 11.29:

$$z_2 = \frac{0,1 \cdot 28,9}{0,06 \cdot 12^2} \cdot \sqrt{\frac{0,007}{0,1105}} = 0,084 < 1.$$

Тоді параметр x_0 згідно з формулою 11.31:

$$x_0 = 0,084 \cdot 98,27 - 2,071 = 6,184 \text{ м}$$

- параметр Z_l за формулою 11.28:

$$z_l = \frac{1000 + 6,184}{98,27} = 10,24 > 1.$$

Тоді функція $\Phi(z_l) = \sqrt{z_l} = 2,27$

$$\Phi(z_l) = \sqrt{z_l} = 3,20.$$

Оскільки течія морської води у місці скиду стічних вод не спрямовано уздовж берега, то параметр, що враховує вплив найближчого берега на кратність основного розбавлення $\gamma_0 = 1$.

Визначаємо коефіцієнт неконсервативності забруднюючої речовини:

- оскільки $u_m < 0,2 \text{ м}/\text{с}$, поправка на швидкість течії

$$\alpha = 5 - 4 \exp[-0,06 \cdot (7 + 80 \cdot 0,06)] = 3,4;$$

- поправка на температуру морської води: $k_T = 0,0451 \cdot 16 + 0,101 = 0,823$;

$$k = 3,4 \cdot 0,38 \cdot 0,823 = 1,063 \text{ доба}^{-1}.$$

Визначаємо коефіцієнт ξ (формула 11.33):

$$\xi = \exp\left[\frac{1,063 \cdot (1000 + 6,184)}{86400 \cdot 0,06}\right] = 0,014.$$

11. Визначаємо кратність основного розбавлення n_o за формулою 11.27:

$$n_o = \frac{3,20}{1 \cdot 0,084} \cdot 0,014 = 0,53.$$

12. Загальне розбавлення стічних вод у морі знайдемо, як добуток початкового та основного:

$$n = 28,9 \cdot 0,53 = 15,32.$$

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. **Родзиллер, И. Д.** Прогноз качества воды водоемов-приемников сточных вод [Текст] / И. Д. Родзиллер. – М. : Стройиздат, 1984. – 263 с.
2. **Караушев, А. В.** Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод [Текст] / Под ред. А. В. Караушева. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 285 с.
3. **Лапшев, Н. Н.** Расчеты выпусков сточных вод [Текст] / Н. Н. Лапшев. – М. : Стройиздат, 1977. – 87 с.
4. **Лаврик, В. І.** Моделювання та прогнозування стану довкілля [Текст]: підручник/ В. І. Лаврик, В. М. Боголюбов, Л. М. Полетаєва, С. М. Юрасов, В. Г. Ільїна. – К. : Альма-матер, 2010. – 357 с.
5. **Полетаєва, Л. М.** Моделювання та прогнозування стану довкілля [Текст]. Конспект лекцій. / Л. М. Полетаєва, С. М. Юрасов, В. Г. Ільїна. – О. : ОДЕКУ, 2004. – 191 с.
6. Інструкція про порядок розробки та затвердження гранично допустимих скидів (ГДС) речовин у водні об'єкти із зворотними водами [Текст] / Мінприроди України. – К., 1994. - 89 с.
7. **Зац, В. И.** Об устойчивости затопления полей сточных вод в промежуточном слое стратифицированного моря // Водные ресурсы. – 1975. – № 1. – С. 180–191.
8. **Озмидов, Р. В.** Диффузия примесей в океане [Текст] / Р. В. Озмидов. – Л. : Гидрометеиздат, 1986. – 129 с.
9. **Бруяцкий, Е. В.** Турбулентные стратифицированные струйные течения [Текст] / Е. В. Бруяцкий. – К. : Наукова думка, 1986. – 296 с.
10. **Баранник, В. А.** Расчет локального влияния сосредоточенного выпуска сточных вод на качество воды водоема. [Текст] / В. А. Баранник, В. С. Кресин // Водоохранные комплексы речных бассейнов: Сб. научн. тр. – Х. : ВНИИВО, 1985. – С. 95–101.
11. **Лихачев, Н. И.** Канализация населенных мест и промышленных предприятий [Текст] / Н. И. Лихачев, И. И. Ларин, С. А. Хаскин и др. – М. : Стройиздат, 1981. – 639 с.
12. **Тарнопольский, А. Г.** Турбулентность шельфовой зоны моря // Морской гидрофизический журнал. – 1991. – № 1. – С. 29–35.
13. **Тарнопольский, А. Г.** Вертикальная структура неглубокого турбулентного моря // Тр. ГОИН. – 1991. – Вып. 202. – С. 99–109.
14. **Фельзенбаум, А. И.** Теоретические основы и методы расчета установившихся течений [Текст] / А. И. Фельзенбаум – М. : Изд-во АН СССР, 1960. – 127 с.
15. **Вольцингер, Н. Е.** Теория мелкой воды [Текст] / Н. Е. Вольцингер, Р. В. Пясковский. – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 208 с.
16. **Саркисян, А. С.** Численный анализ и прогноз морских течений [Текст] / А. С. Саркисян. – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 208 с.

17. **Баранник, В. А.** Расчет кратности основного разбавления сточных вод, поступающих в водохранилище из рассеивающего выпуска сложной конфигурации [Текст] / В. А. Баранник, В. С. Кресин // Охрана вод речных бассейнов: Сб. научн. тр. – Х. : ВНИИВО, 1987. – С. 132–137.

18. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни "Водопостачання, водовідвід, поліпшення якості води" [Текст] / С. С. Рижков [и др.] ; Національний ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. – Миколаїв : НУК, 2009. – 43 с.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
<i>Практична робота № 8. Визначення ступеню розбавлення стічних вод у річках.....</i>	<i>4</i>
<i>Практична робота № 9. Розрахунок кратності розбавлення стічних вод методом А.В. Караушева.....</i>	<i>10</i>
<i>Практична робота № 10. Розрахунок розбавлення стічних вод у озерах та водосховищах.....</i>	<i>18</i>
<i>Практична робота № 11. Розрахунок кратності розбавлення стічних вод у морі.....</i>	<i>23</i>
Список літератури.....	33