

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

З Б І Р Н И К
МЕТОДИЧНИХ ВКАЗІВОК
до практичних занять з дисципліни

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ

Частина 2

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ВОДНОГО
СЕРЕДОВИЩА**

Затверджено на засіданні кафедри
прикладної екології
протокол № ____ від _____._____. 2019 р.
Зав. кафедрою

_____ Сафранов Т.А.

Одеса 2019

УДК 504
ББК 28.081
П-49

Рекомендовано Методичною радою Одеського державного екологічного університету Міністерства освіти і науки України як конспект лекцій (протокол № __ від __. __2019 р.).

С.М. Юрасов

Моделювання та прогнозування стану довкілля. Розділ 2. Моделювання та прогнозування стану водного середовища: Збірник методичних вказівок до практичних занять – Одеса: ОДЕКУ, 2019. 41 с.

Збірник методичних вказівок присвячений проблемі застосування методів математичного моделювання стану та прогнозу забруднення природних вод.

Збірник методичних вказівок розраховано на студентів очної та заочної форми навчання спеціальності “Екологія та охорона навколишнього середовища” при вивченні дисципліни “Моделювання та прогнозування стану довкілля”.

З М І С Т

Вступ.....	4
1 Прогноз висоти хвиль рідкісної повторюваності.....	5
1.1 Основні положення.....	5
1.2 Побудова режимної функції.....	7
1.3 Прогноз висоти хвиль.....	7
Контрольні запитання.....	8
Завдання для самостійної роботи.....	8
Приклад прогнозу висоти хвиль.....	10
Перелік посилань.....	12
2 Розрахунок розводження стічних вод у потоці (плоска постановка задачі).....	13
2.1 Основні положення.....	13
2.2 Вихідні дані.....	14
2.3 Послідовність розрахунку.....	14
Контрольні запитання.....	15
Завдання для самостійної роботи.....	16
Приклад розрахунку.....	16
Перелік посилань.....	17
3 Розрахунок розводження стічних вод у потоці (просторова задача).....	18
3.1 Основні положення.....	18
3.2 Вихідні дані для розрахунку.....	18
3.3 Послідовність розрахунку.....	18
Контрольні запитання.....	20
Завдання для самостійної роботи.....	20
Приклад розрахунку.....	20
Перелік посилань.....	21

4	Розрахунок розповсюдження речовини у водному середовищі при аварійних розливах (в циліндричних координатах).....	<u>23</u>
4.1	Основні положення.....	<u>23</u>
4.2	Вихідні дані для розрахунку.....	<u>23</u>
4.3	Послідовність розрахунку.....	<u>23</u>
	Контрольні запитання.....	<u>24</u>
	Завдання для самостійної роботи.....	<u>24</u>
	Приклад розрахунку.....	<u>25</u>
	Перелік посилань.....	<u>25</u>
5	Розрахунок розповсюдження речовини у водному середовищі при аварійних розливах (в прямокутних координатах).....	<u>27</u>
5.1	Основні положення.....	<u>27</u>
5.2	Вихідні дані.....	<u>27</u>
5.3	Послідовність розрахунку.....	<u>27</u>
	Контрольні запитання.....	<u>29</u>
	Завдання для самостійної роботи.....	<u>29</u>
	Приклад розрахунку.....	<u>30</u>
	Перелік посилань.....	<u>30</u>
6	Спрощені методи розрахунку розповсюдження речовини в потоках.....	<u>32</u>
6.1	Метод УралНДІВГ.....	<u>32</u>
6.2	Метод Таллінського політехнічного інституту (ТПІ).....	<u>34</u>
6.3	Експрес – метод ДГІ.....	<u>36</u>
6.4	Метод ВОДГЕО.....	<u>36</u>
	Контрольні запитання.....	<u>37</u>
	Завдання для самостійної роботи.....	<u>38</u>
	Приклади розрахунку.....	<u>38</u>
	Перелік посилань.....	<u>40</u>

ВСТУП

Метою курсу “Моделювання та прогнозування стану довкілля” є формування у студентів теоретичних знань та практичних навичок у галузі математичного моделювання реальних процесів розповсюдження забруднювальних речовин у довкіллі. Отримані знання та навички необхідні для роботи у державних та відомчих виробничих підрозділах, що здійснюють контроль стану навколишнього природного середовища, а також у науководослідних установах, які займаються проблемами охорони довкілля.

Завдання курсу – вивчення механізму забруднення навколишнього середовища, транспортування, міграції, перетворення забруднювальних речовин; засвоєння узагальнених моделей якості атмосферного повітря та води.

Вивчення курсу базується на знаннях дисциплін “Основи загальної екології”, “Моніторинг навколишнього середовища”. Отримані знання будуть використовуватись при вивченні таких дисциплін, як “Методи оцінки якості природних вод”, “Основи екологічної безпеки територій та акваторій”, “Екологічний аудит”.

Загальний обсяг годин відведених на вивчення дисципліни складає 210 годин (60 години лекційного курсу, 30 години практичних занять, 120 годин самостійної роботи). Головною формою організації вивчення курсу є самостійна робота над програмою курсу, лекції та практичні заняття. Формою контролю засвоєння знань є курсовий проект та практичні роботи протягом семестру.

Завдання за відповідною темою виконується після засвоєння теоретичного матеріалу, в якому міститься необхідна інформація щодо виконання розрахунків. Всі завдання складається з трьох частин: перша – теоретична, друга – розрахункова, третя – аналітична.

В результаті виконання робіт студенти повинні *знати*: основні терміни і поняття, що використовуються в межах означеної дисципліни; основні принципи, підходи та методи оцінки і прогнозу стану довкілля; головні фактори середовища, що впливають на забруднення довкілля; основні математичні моделі розрахунку розповсюдження шкідливих домішок; а також *вміти* скласти прогноз висоти хвиль рідкісної повторюваності, розрахувати поле концентрації речовини при скиді стічних вод.

Протягом семестру студент виконує дві практичних роботи та одне індивідуальне завдання:

за кожну роботу студент отримує максимум 5 балів;

за індивідуальне завдання – максимум 10 балів.

1 ПРОГНОЗ ВИСОТИ ХВИЛЬ РІДКІСНОЇ ПОВТОРЮВАНОСТІ

1.1 Основні положення

Будь-який шторм являє собою систему хвиль, в якій висота хвиль є випадковою величиною з деяким законом розподілу. Закон розподілу висоти хвиль у штормі називають розподілом в системі. Найчастіше цей розподіл використовують у вигляді інтегрального закону, за яким можна оцінити ймовірність перевищення деякого значення висоти хвиль, тобто забезпеченість цього значення.

В даний час параметри розподілу в системі визначені. Вони залежать від співвідношення середньої довжини хвиль і глибини розглянутої ділянки водного об'єкта. Задається цей розподіл в табличному вигляді (табл. 1.1), де $k^{(C)}$ – висота хвиль із забезпеченістю $F^{(C)}$ в системі в частках від середньої висоти, $k^{(C)}$ ще називають перехідними коефіцієнтами.

Таблиця 1.1 – Перехідні коефіцієнти $k^{(C)}$ (для глибокої води – $H/\lambda \geq 0,5$, де H – середня глибина акваторії; λ – середня довжина хвиль)

$F^{(C)}, \%$	45,7	13	5	3	1	0,1
$k^{(C)} = h^{(C)}/h^{(CEP)}$	1,00	1,61	1,94	2,10	2,40	2,94

Енергію шторму заведено характеризувати однією висотою хвиль, її називають характерною. В якості характерної може використовуватись будь-яка висота хвиль. Однак, найчастіше використовують середню або із забезпеченістю 3% в системі.

Крім розподілу в системі у висоти хвиль є ще розподілення у режимі. Під розподілом в режимі розуміють закон розподілу характерної висоти хвиль в часі. Розподіл в режимі, як і розподіл у системі, представляють у вигляді інтегрального закону, що дозволяє оцінити забезпеченість деякого значення висоти хвиль. Графік або аналітичну формулу розподілу в режимі називають режимною функцією.

Таким чином, режимна функція висоти хвиль, як випадкової величини, являє собою закон її розподілу в часі. Вона дозволяє визначити забезпеченість F_p заданого значення висоти хвиль і навпаки: за заданою частотою оцінити висоту хвиль. У цій функції висота характеризує не тільки енергію хвилі, а й силу шторму, тобто режимна функція практично дозволяє оцінити частоту виникнення штормів різної сили.

При проектуванні гідротехнічних споруд розглядають шторми, які виникають з частотою 1 раз в 25, 50 або 100 років (4, 2 або 1% в режимі). Тут необхідно зазначити, що частота і забезпеченість мають різні значення для однієї і тієї ж висоти хвиль. Нижче наведена формула, за якою перераховується необхідна частота в забезпеченість.

Режимна функція будується за середніми значеннями висоти хвиль $h^{(CEP)}$ у разі, 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% в системі), оскільки теоретично встановлено, що відповідно до методики проведення спостережень за хвилюванням на гідрологічних постах результати спостережень мають 3%-у забезпеченість в системі.

Режимні функції висоти хвиль можуть бути побудовані по восьми румбах: Пн, ПнС, С, ПдС, Пд, ПдЗ, З і ПнЗ. Однак при прогнозуванні розглядаються не всі ці напрямки, а тільки хвиленебезпечні, тобто ті, в яких спостерігається найбільша довжина розгону хвиль і найбільш часті й сильні вітри.

Побудова режимної функції може виконуватись графічно і аналітично. Розглянемо аналітичну методику.

Вигляд закону розподілу висоти хвиль в часі відомий – це закон розподілу Вейбула:

$$F_P = \exp(-\alpha h^\beta), \quad (1.1)$$

де α і β – параметри закону розподілу.

Знайти ці параметри можна при статистичній обробці результатів спостережень. Для цього необхідно спочатку вирівняти вихідні дані (тобто привести нелінійну залежність до лінійного вигляду):

$$\begin{aligned} F_P = \exp(-\alpha h^\beta) &\rightarrow 1/F_P = \exp(\alpha h^\beta) \rightarrow \ln(1/F_P) = \alpha h^\beta \rightarrow \\ &\rightarrow \ln \ln(1/F_P) = \ln \alpha + \beta \ln h \rightarrow \{Y = \ln \ln(1/F_P); \alpha^* = \ln \alpha; X = \ln h\} \rightarrow \\ &\rightarrow Y = \alpha^* + \beta X. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Методом найменших квадратів можна знайти параметри отриманого рівняння регресії, вони будуть рівні:

$$\beta = r_{XY} \sigma_Y / \sigma_X, \quad (1.3)$$

$$\alpha^* = Y_{CEP} - \beta X_{CEP}, \quad (1.4)$$

де r_{XY} – коефіцієнт кореляції ряду X і ряду Y ;
 σ_Y – середньоквадратичне відхилення ряду Y ;
 σ_X – середньоквадратичне відхилення ряду X ;
 Y_{CEP} – середнє значення ряду Y ;
 X_{CEP} – середнє значення ряду X .

Всі ці характеристики визначаються шляхом статистичної обробки результатів спостережень за формулами:

$$X_{CEP} = (\sum X_i)/n; \quad Y_{CEP} = (\sum Y_i)/n; \quad (1.5)$$

$$\sigma_X = [(\sum (X_i - X_{CEP})^2)/(n-1)]^{0,5}; \quad \sigma_Y = [(\sum (Y_i - Y_{CEP})^2)/(n-1)]^{0,5}; \quad (1.6)$$

$$r_{XY} = [\sum (Y_i - Y_{CEP}) (X_i - X_{CEP})]/[(n-1)\sigma_Y\sigma_X]. \quad (1.7)$$

1.2 Побудова режимної функції

Послідовність розрахунку:

- члени ряду спостережень за хвилюванням $h_i^{(3)}$ ранжируються в спадному порядку і нумеруються;
- за номером члена ряду розраховується режимна забезпеченість за формулою:

$$F_{Pi} = i/(n + 1), \quad (1.8)$$

де i – номер члена ранжируваного ряду;

n – кількість членів ряду;

- по ряду F_{Pi} розраховується ряд $Y_i = \ln \ln(1/F_{Pi})$, а по ряду $h_i^{(3)}$ розраховується ряд $X_i = \ln h_i$;

- для рядів Y і X розраховуються середні значення рядів, середньоквадратичні відхилення і коефіцієнт кореляції;

- за цими характеристиками розраховуються параметри α^* і β ;

- розраховується параметр $\alpha = \exp(\alpha^*)$;

- для кожного члена ряду F_{Pi} розраховується відповідне йому $h^{(3)}_{Pi}$ за формулою:

$$h^{(3)}_{Pi} = [(1/\alpha) \ln(1/F_{Pi})]^{1/\beta}; \quad (1.9)$$

- перевіряється точність апроксимації:

$$S = [(\sum (h^{(3)}_i - h^{(3)}_{Pi})^2)/n]^{0,5}, \quad (1.10)$$

$$S_H = S/h^{(3)}_{CEP},$$

де $h^{(3)}_{CEP}$ – середнє значення ряду спостережень за хвилюванням.

1.3 Прогноз висоти хвиль

Прогноз висоти хвиль рідкісної повторюваності необхідний при проектуванні гідротехнічних споруд для забезпечення їх стійкості, для оцінки ймовірності аварійних ситуацій на цих спорудах і розрахунків розмірів збитків при розробці розділів ОВНС.

Прогноз режиму хвилювання виконується у такій спосіб:

- за даними спостережень будується режимна функція для характерної висоти хвиль $h^{(3)}$ (або $h^{(CEP)}$);
- потім для частоти 1 раз на n_P років ($1/n_P$) розраховують відповідну їй забезпеченість F_P за формулою

$$F_P = \Delta t_{шторм} / (T_B n_P P_H), \quad (1.11)$$

де $\Delta t_{шторм}$ – середня тривалість шторму, д.;

T_B – середня тривалість безльодового періоду, д.;

n_P – нормативна кількість років, протягом яких може виникнути розрахунковий шторм;

P_H – ймовірність розглянутого напрямку;

- по режимній функції (1.9) і F_P знаходять значення висоти хвиль $h_P^{(3)}$ з відповідною частотою в режимі;

- по $h_P^{(3)}$ і відповідному перехідному коефіцієнту $k^{(C)}$ (табл. 1.1) знаходять значення висоти хвиль $h_P^{(C)}$ із забезпеченістю $F^{(C)}$ в системі:

$$h_P^{(C)} = h_P^{(3)} k^{(C)} / k^{(3)} = h_P^{(3)} k^{(C)} / 2,10. \quad (1.12)$$

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. За якими напрямками 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

По варіанту спостережень за хвилюванням необхідно дати прогноз висоти хвиль малої забезпеченості, для цього: побудувати режимну функцію висоти хвиль; зіставити її з результатами спостережень; визначити розрахункові значення висоти хвиль із заданою за варіантом забезпеченістю в режимі.

Таблиця 1.2 – Результати спостережень за варіантами

№ п / П	Результати спостережень за хвилюванням за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,26	0,44	2,30	1,45	0,54	0,25	1,14	1,57	0,52	0,59
2	0,29	1,80	1,09	1,76	0,61	1,30	1,13	1,78	0,34	0,92
3	0,50	1,60	1,62	0,95	0,83	0,98	1,29	1,63	0,37	0,87
4	1,06	1,32	1,57	1,61	2,00	1,80	0,96	1,34	0,59	1,42
5	1,10	1,16	1,42	1,54	0,73	1,40	1,23	1,21	0,29	0,37
6	1,81	0,77	1,50	1,41	2,95	0,69	0,85	0,92	0,60	0,23
7	1,08	0,90	1,00	1,33	2,35	1,05	0,69	0,91	0,57	1,10
8	0,92	1,14	0,89	1,31	1,37	1,15	0,59	0,94	0,36	0,86
9	0,94	0,72	0,96	1,09	2,90	1,00	0,65	0,79	0,38	0,31
10	0,86	0,44	0,89	1,03	1,35	0,45	0,69	1,06	0,24	0,73
11	0,88	0,34	1,55	1,49	2,38	0,36	0,93	0,94	0,36	0,15
12	0,52	0,23	1,85	1,61	0,56	0,30	0,98	1,50	0,73	0,11
13	0,36	0,23	1,53	1,55	0,56	0,24	1,11	1,73	0,20	0,65
14	0,86	0,50	1,50	1,72	0,69	0,62	1,20	1,75	0,34	0,31
15	0,31	2,58	2,15	1,64	0,50	1,50	1,22	1,96	0,41	0,41
16	0,78	0,84	1,44	1,30	2,12	0,80	1,13	1,56	0,92	0,36
17	0,70	1,20	1,63	1,27	1,30	0,85	0,97	1,19	0,68	0,87
18	1,36	1,64	2,04	1,29	2,75	1,55	0,95	1,03	1,10	0,88
19	1,08	1,28	0,81	0,98	2,35	1,15	0,75	0,83	1,30	0,87
20	0,84	1,10	1,26	1,38	1,18	1,05	0,70	0,69	0,23	0,68
21	0,76	0,76	1,03	1,37	0,67	0,95	0,49	0,74	0,92	0,59
22	0,90	0,61	0,96	1,20	1,83	1,00	0,86	0,46	0,74	0,44
23	0,72	0,56	0,99	1,56	0,98	0,52	1,10	1,48	0,73	0,28
24	0,72	0,40	1,33	1,99	0,22	0,48	1,20	1,45	0,30	0,25
25	0,32	0,44	1,14	1,45	0,34	1,75	1,28	1,63	0,36	0,28
26	0,96	0,34	1,15	1,85	0,40	0,75	1,53	1,70	0,46	0,39
27	0,84	0,74	1,93	1,16	0,48	1,25	1,98	1,61	0,78	0,21
28	1,66	0,96	1,58	1,66	1,55	1,70	2,03	1,38	0,46	1,23
29	1,06	0,78	1,32	0,88	2,30	1,40	1,77	0,96	1,11	0,62
30	1,06	0,86	1,61	0,90	1,60	1,70	2,61	0,95	0,80	0,59
31	1,00	0,92	1,54	1,06	0,82	2,70	0,86	0,92	0,55	0,67
32	1,12	1,16	1,32	1,30	2,13	2,80	1,01	0,85	0,80	0,69
33	1,10	1,21	1,32	1,30	1,10	3,25	0,95	0,98	0,77	0,73
34	0,84	0,99	1,14	1,33	0,74	2,80	1,06	0,83	0,83	0,68
35	0,46	0,50	1,45	1,23	0,56	3,00	1,29	1,09	0,77	0,65
36	0,32	0,41	1,43	1,47	0,49	2,10	1,09	1,57	0,25	0,22
37	0,41	0,46	1,42	1,41	0,79	2,30	1,73	1,67	0,20	0,50
38	0,40	0,36	1,93	1,08	0,83	2,29	1,74	1,49	0,22	0,07
39	0,52	0,56	1,32	1,26	0,82	2,50	1,87	1,24	0,26	0,84

Кінець табл. 1.2

№ п / п	Результати спостережень за хвилюванням за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
40	0,92	0,70	1,32	0,98	1,05	1,35	1,67	1,19	0,54	0,93
41	1,06	0,96	1,42	1,06	1,55	2,20	1,51	1,07	1,28	2,30
42	1,26	1,16	1,50	1,11	1,45	4,35	1,34	0,83	1,03	0,58
43	1,04	1,50	1,05	0,69	1,80	4,15	1,09	0,72	1,90	0,60
44	1,21	1,76	1,21	1,16	0,88	3,75	1,12	0,85	1,60	0,54
45	1,08	1,32	0,92	2,13	1,10	1,13	0,91	0,97	0,91	0,28
46	0,82	0,86	1,12	1,40	1,35	1,25	0,71	0,86	0,80	0,45
47	0,58	0,46	1,28	1,35	1,40	1,10	1,02	1,00	1,47	0,20
48	0,59	0,34	0,93	1,67	0,80	1,35	1,19	1,14	0,45	0,53
49	0,36	0,48	0,91	1,32	0,28	0,70	1,27	1,43	0,59	0,33
P_H	0,23	0,18	0,12	0,15	0,22	0,18	0,23	0,13	0,20	0,19
$\Delta t_{шт}$	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
n_p	50	100	25	50	100	50	25	50	100	25

Приклад прогнозу висоти хвиль

Необхідно дати прогноз висоти хвиль шторму 4% в режимі (частота 1 раз в 25 років) $P_H = 0,20$. Вихідні дані і розрахунок наведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Приклад розрахунку

№	F_{Pi}	$Y_i = \ln \ln(1/F_{Pi})$	$h_i^{(3)}$		$X_i = \ln h_i$	$h^{(3)}_{Pi}$	$(h^{(3)}_i - h^{(3)}_{Pi})^2$
			спостер.	ранжир.			
1	0,02	1,364	1,30	1,90	0,642	1,95	0,002704
2	0,04	1,169	0,12	1,60	0,470	1,71	0,011650
3	0,06	1,034	0,92	1,47	0,385	1,56	0,007654
4	0,08	0,927	0,74	1,42	0,351	1,45	0,000706
5	0,10	0,834	0,73	1,30	0,262	1,36	0,003337
6	0,12	0,752	0,30	1,28	0,247	1,28	0,000010
7	0,14	0,676	0,36	1,11	0,104	1,22	0,011779
8	0,16	0,606	0,46	1,10	0,095	1,16	0,003749
9	0,18	0,539	0,78	1,03	0,030	1,11	0,006332
10	0,20	0,476	0,46	0,92	-0,083	1,06	0,020283
11	0,22	0,415	1,11	0,92	-0,083	1,02	0,009784
12	0,24	0,356	0,80	0,91	-0,094	0,98	0,004684
13	0,26	0,298	0,55	0,88	-0,128	0,94	0,003662
14	0,28	0,241	0,80	0,87	-0,139	0,90	0,001208
15	0,30	0,186	0,77	0,87	-0,139	0,87	0,000001

Кінець табл. 1.3

№	F_{Pi}	$Y_i = \ln \ln(1/F_{Pi})$	$h_i^{(3)}$		$X_i = \ln h_i$	$h^{(3)}_{Pi}$	$(h^{(3)}_i - h^{(3)}_{Pi})^2$
			спостер.	ранжир.			
16	0,32	0,131	0,83	0,86	-0,151	0,84	0,000457
17	0,34	0,076	0,77	0,83	-0,186	0,81	0,000492
18	0,36	0,021	0,25	0,80	-0,223	0,78	0,000473
19	0,38	-0,033	0,20	0,80	-0,223	0,75	0,002520
20	0,40	-0,087	0,22	0,80	-0,223	0,72	0,006031
21	0,42	-0,142	0,26	0,78	-0,248	0,70	0,007095
22	0,44	-0,197	0,54	0,77	-0,261	0,67	0,010001
23	0,46	-0,253	1,28	0,77	-0,261	0,64	0,015642
24	0,48	-0,309	1,03	0,74	-0,301	0,62	0,014278
25	0,50	-0,367	1,90	0,73	-0,315	0,60	0,017780
26	0,52	-0,425	1,60	0,59	-0,528	0,57	0,000278
27	0,54	-0,484	0,91	0,59	-0,528	0,55	0,001564
28	0,56	-0,545	0,80	0,55	-0,598	0,53	0,000485
29	0,58	-0,607	1,47	0,54	-0,616	0,51	0,001164
30	0,60	-0,672	0,45	0,46	-0,777	0,48	0,000581
31	0,62	-0,738	0,59	0,46	-0,777	0,46	0,000007
32	0,64	-0,807	0,59	0,45	-0,799	0,44	0,000075
33	0,66	-0,878	0,92	0,41	-0,892	0,42	0,000105
34	0,68	-0,953	0,87	0,37	-0,994	0,40	0,000861
35	0,70	-1,031	1,42	0,36	-1,022	0,38	0,000343
36	0,72	-1,113	0,37	0,36	-1,022	0,36	0,000005
37	0,74	-1,200	0,23	0,31	-1,171	0,34	0,000733
38	0,76	-1,293	1,10	0,31	-1,171	0,32	0,000040
39	0,78	-1,392	0,86	0,30	-1,204	0,30	0,000020
40	0,80	-1,500	0,31	0,26	-1,347	0,27	0,000211
41	0,82	-1,617	0,07	0,25	-1,386	0,25	0,000011
42	0,84	-1,747	0,15	0,23	-1,470	0,23	0,000003
43	0,86	-1,892	0,11	0,22	-1,514	0,21	0,000101
44	0,88	-2,057	0,07	0,20	-1,609	0,19	0,000158
45	0,90	-2,2 50	0,31	0,15	-1,897	0,16	0,000202
46	0,92	-2,484	0,41	0,12	-2,120	0,14	0,000396
47	0,94	-2,783	0,36	0,11	-2,207	0,11	0,000016
48	0,96	-3,199	0,87	0,07	-2,617	0,09	0,000163
49	0,98	-3,902	0,88	0,07	-2,659	0,05	0,000290
<i>Середнє</i>		-0,5481	0,6776		-0,6408		$S = 0,05892$
σ		1,171			0,7968		$S/h^{(3)}_{CEP} = 0,0870$
r_{XY}		0,9935					

Розрахунок виконується згідно з п.п. 1.2 та 1.3:

$$\beta = r_{XY} \sigma_Y / \sigma_X = 0,9935 * 1,171 / 0,7968 = 1,460;$$

$$\alpha^* = Y_{CEP} - \beta X_{CEP} = -0,5481 - 1,460 * (-0,6408) = 0,3875;$$

$$\alpha = \exp(\alpha^*) = \exp(0,3875) = 1,473;$$

$$F_P = \exp(-\alpha h^\beta) = \exp(-1,473 h^{1,460});$$

$$h^{(3)}_{Pi} = [(1/\alpha) \ln(1/F_{Pi})]^{1/\beta} = [0,6789 \ln(1/F_{Pi})]^{0,6849};$$

$$F_P = \Delta t_{um} / (T_B n_P P_H) = 0,5 / (365 * 25 * 0,20) = 0,000274;$$

$$h_4^{(3)} = [0,6789 \ln(1/0,000274)]^{0,6849} = 3,24;$$

$h_4^{(5)} = h_P^{(3)} k^{(5)} / 2,10 = 3,24 * 1,94 / 2,10 = 2,99...$ (перехідні коефіцієнти приймаються за табл. 1.1).

Таблиця 1.4 – Результати розрахунку

$S/h^{(3)}_{CEP}$	0,0870	$h_4^{(3)}$, м	3,24
β	1,460	$h_4^{(5)}$, м	2,99
α	1,473	$h_4^{(1)}$, м	3,70
F_P	0,000274	$h_4^{(0,1)}$, м	4,54

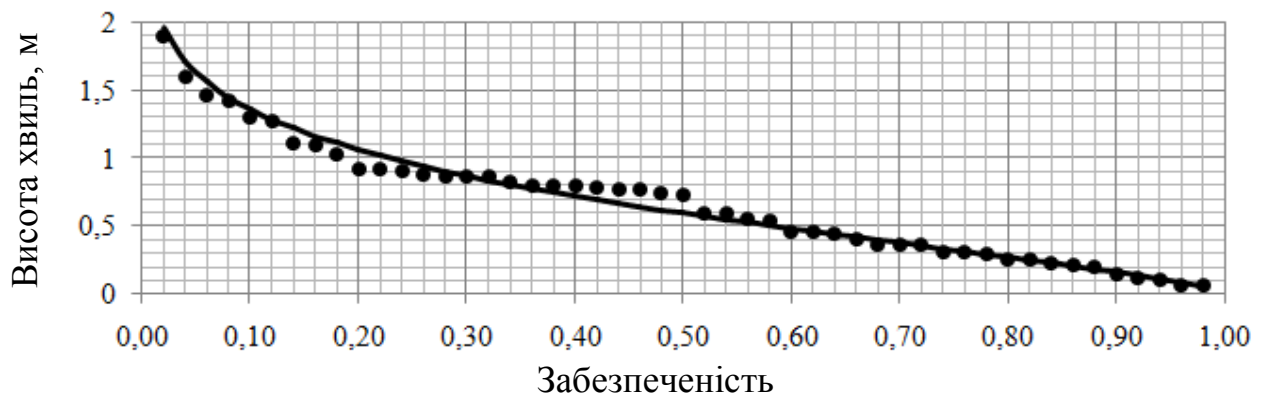


Рис. 1.1 – Режимна функція висоти хвиль

Перелік посилань

1. Юрасов С.М. Частина 2. Моделювання та прогнозування стану водного середовища / Конспект лекцій. Одеса: ОДЕКУ, 2019. 42 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 РОЗРАХУНОК РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СТІЧНИХ ВОД У ПОТОЦІ (ПЛОСКА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ)

2.1 Основні положення

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

Розрахунок виконується покрокове від початкового створу, де розподіл концентрації речовини задається, до контрольного створу за формулами:

$$C_{k+1,m} = 0,50C_{k,m} + 0,25(C_{k,m+1} + C_{k,m-1}), \quad (2.1)$$

при $2 \leq m \leq N-1$;

$$C_{k+1,1} = 0,25C_{k,2} + 0,75C_{k,1}; \quad (2.2)$$

$$C_{k+1,N} = 0,25C_{k,N-1} + 0,75C_{k,N}. \quad (2.3)$$

при $\Delta x = V_C \Delta z^2 / (4D)$. (2.4)

$$C_{0,m} = C_{CT}, \quad \text{при } 1 \leq m \leq b/\Delta z;$$

$$C_{0,m} = C_E, \quad \text{при } b/\Delta z < m.$$

де $C_{k,m}$ – концентрація речовини в k -у створі в струмені m , мг/дм³;

N – кількість струменів по ширині річки;

Δx – відстань між створами, м;

V_C – середня швидкість потоку, м/с;

Δz – ширина струменів, м;

D – коефіцієнт турбулентної дифузії, м²/с;

$C_{0,m}$ – концентрація речовини в початковому створі ($k=0$), мг/дм³.

2.2 Вихідні дані для розрахунку:

Q_E – витрата води у потоці вище від місця скиду стічних вод, м³/с;

C_E – концентрація домішки у воді потоку вище місця скиду (фонова концентрація), мг/дм³;

Q_{CT} – витрата стічних вод, м³/с;

C_{CT} – концентрація домішки у стічних водах, мг/дм³;

V_C – середня швидкість потоку на розрахунковій ділянці, м/с;

B_C – середня ширина потоку у місті скиду, м;

H_C – середня глибина потоку на розрахунковій ділянці, м;

D – коефіцієнт турбулентної дифузії (м²/с), який розраховується за формулою:

$$D = gH_C V_C / (MC), \quad (2.5)$$

де C – коефіцієнт Шезі (м^{0.5}/с), визначається по таблиці 2.1 в залежності від типу водотоку [2];

M – параметр, розраховується за формулою (2.6):

$$M = \begin{cases} 0,7C + 6, & \text{при } 10 < C < 60, \\ 48, & \text{при } C > 60. \end{cases} \quad (2.6)$$

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

Таблиця 2.1 Типізація водотоків за особливостями гідродинамічного режиму

Тип водотоку	Група	Перемішування	Грунт	C , м ^{0.5} /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

2.3 Послідовність розрахунку

1. Визначається умовна площа поперечного перерізу припливу стічних вод, виходячи з припущення, що швидкість стічних вод у потоці

дорівнює швидкості самого потоку:

$$\delta = Q_{CT}/V_C. \quad (2.7)$$

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

$$b = \delta/H_C. \quad (2.8)$$

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

$$\Delta z = b/n_0; \quad n_0 = 1, 2, \dots \quad (2.9)$$

4. Визначається довжина розрахункового осередку:

$$\Delta x = V_C \Delta z^2 / (4D). \quad (2.10)$$

5. Визначається загальна кількість струменів по ширині потоку:

$$N = B_C / \Delta z. \quad (2.11)$$

6. На розрахунковій області потоку розбивається сітка з осередками Δx , Δz (з кроком Δx проводяться створи, з кроком Δz – струмені). У початковому створі в n_0 клітинок, що відповідають місцю розташування скиду стічних вод, записується значення концентрації домішки у стічних водах (C_{CT}). В решту $N - n_0$ осередків початкового створу записуються значення фонові концентрації (C_E).

7. Розрахунок концентрації домішки в осередках наступного створу здійснюється за формулою (2.1).

При розрахунках у меж потоку використовуються формули (2.2) чи (2.3).

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

В усіх створах сума концентрацій домішки повинна бути постійна.

Контрольні запитання

1. Які методи розрахунку розводження стічних вод називаються детальними?
2. Запишіть рівняння турбулентної дифузії для плоскої задачі при відсутності поперечних течій, нехтуючи гідравлічною крупністю частинок і враховуючи процес розводження стаціонарним?
3. Як задається сітка на розрахунковій області потоку?

4. Запишіть розрахункову формулу, за яких умов 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?

Завдання для самостійної роботи

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

Таблиця 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
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
Z_{CT}	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 фоновією концентрацією домішки $C_E = 2 \text{ мг}/\text{дм}^3$ скидаються стічні води з витратою $Q_{CT} = 0,6 \text{ м}^3/\text{с}$ та концентрацією домішки $C_{CT} = 120 \text{ мг}/\text{дм}^3$.

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 30. 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) приймаємо $n_0 = 2$, тоді $\Delta z = 2,48/2 = 1,24 \text{ (м)}$.

4) Для розрахунку Δx попередньо визначаємо значення коефіцієнта

D :

$$D = (9,8*1,10*0,22) / (30*(0,7*30 + 6)) = 0,00293 \text{ (м}^2\text{/с)},$$

$$\Delta x = (0,22*(1,24)^2) / (4*0,00293) = 28,9 \text{ (м)}.$$

$$5) N = 37,0 / 1,24 = 30.$$

б) В n_0 осередків ($n_0=2$) на відстані 2,5 м від берега вписуємо концентрацію 120 мг/дм^3 , в інші 28 осередків – 2 мг/дм^3 (рис. 2.3). В усіх створах сума концентрацій домішки повинна дорівнювати $2*120 + 28*2 = 296 \text{ мг/дм}^3$.

7) Розрахунок концентрацій у наступному створі, розташованому на відстані 28,9 м від початкового, виконується за формулою (2.1), в струмені біля берегу – за формулою (2.2). Сума концентрацій в кожному створі повинна бути постійною. Розрахувавши значення концентрації у розглядуваному створі, переходимо до наступного і т.д.

	0 м	28,9 м	57,8 м	86,7 м	115,6 м
...	2	2	2	2	
8	2	2	2	2	
7	2	2	2	3,84375	
6	2	2	9,375	14,90625	
5	2	31,5	38,875	40,71875	
4	120	90,5	75,750	66,53125	
3	120	90,5	75,750	66,53125	
2	2	31,5	38,875	40,71875	
$m=1$	2	2	9,375	16,75000	
	$\Sigma 296$	296	296	296	

б е р е г

Рис. 2.3 Приклад розрахунку

Висновок. На рис.2.3 видно, що на відстані 87 м від місця скиду стічних вод максимальна концентрація забруднювальної речовини становить $66,5 \text{ мг/дм}^3$.

Перелік посилань

1. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод / под. ред. Караушева А.В. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 285 с.
2. Юрасов С.М. Частина 2. Моделювання та прогнозування стану водного середовища / Конспект лекцій. Одеса: ОДЕКУ, 2019. 42 с.

3 РОЗРАХУНОК РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СТІЧНИХ ВОД У ПОТОЦІ (ПРОСТОРОВА ЗАДАЧА)

3.1 Основні положення

Детальний метод розрахунку розводження стічних вод у потоках в просторовій постановці застосовується у тих випадках, коли скид 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.

Розрахунок виконується за формулами:

$$C_{k+1,n,m} = 0,125(C_{k,n+1,m} + C_{k,n-1,m} + C_{k,n,m+1} + C_{k,n,m-1}) + 0,5C_{k,n,m}, \quad (3.1)$$

$$C_{k+1,1,m} = 0,125(C_{k,2,m} + C_{k,1,m+1} + C_{k,1,m-1}) + 0,625C_{k,1,m}, \quad (3.2)$$

$$C_{k+1,N,m} = 0,125(C_{k,N-1,m} + C_{k,N,m+1} + C_{k,N,m-1}) + 0,625C_{k,N,m}, \quad (3.3)$$

$$C_{k+1,n,1} = 0,125(C_{k,n+1,1} + C_{k,n-1,1} + C_{k,n,2}) + 0,625C_{k,n,m}, \quad (3.4)$$

$$C_{k+1,n,M} = 0,125(C_{k,n+1,M} + C_{k,n-1,M} + C_{k,n,M-1}) + 0,625C_{k,n,m}, \quad (3.5)$$

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

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

3.2 Вихідні дані для розрахунку

Для виконання розрахунку необхідні наступні вихідні дані:

Q_E – витрата води у потоці вище від місця скиду стічних вод, м³/с;

C_E – концентрація домішки у воді потоку вище місця скиду (фонова концентрація), мг/дм³;

Q_{CT} – витрата стічних вод, м³/с;

C_{CT} – концентрація домішки у стічних водах, мг/дм³;

V_C – середня швидкість потоку на розрахунковій ділянці, м/с;

B_C – середня ширина потоку у місті скиду, м;

H_C – середня глибина потоку на розрахунковій ділянці, м;

D – коефіцієнт турбулентної дифузії, розраховується за формулою (2.5), м²/с;

Z_{CT} – місце скиду стічних вод у початковому створі, м.

3.3 Послідовність розрахунку

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

$$\delta = Q_{CT} / V_C. \quad (3.6)$$

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

$$b = \delta / h. \quad (3.7)$$

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

$$b = h = (\delta)^{0.5}. \quad (3.8)$$

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

4. Розраховується Δx за формулою:

$$\Delta x = V_C \Delta z^2 / (8D). \quad (3.9)$$

5. Визначається загальна кількість струменів M і горизонтів N :

$$M = B_C / \Delta z \quad \text{і} \quad N = H_C / \Delta y. \quad (3.10)$$

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

$$m_B = b / \Delta z \quad \text{і} \quad n_H = h / \Delta y. \quad (3.11)$$

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

8. Розрахунок концентрації речовини у осередках другого перерізу відбувається за допомогою формул (3.1) – (3.5).

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

В усіх перерізах сума значень концентрації речовини повинна бути постійна.

9. Результати розрахунку можуть подаватись набором таблиць, кожна із яких відповідає визначеному перерізу, 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):

$$C_P = C - C_E. \quad (3.12)$$

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

1. Які методи розрахунку розводження стічних вод називаються детальними?
2. Запишіть рівняння турбулентної дифузії для просторової задачі при відсутності поперечних течій, нехтуючи гідравлічною крупністю частинок і враховуючи процес розводження стаціонарним.
3. Як задається сітка на розрахунковій області потоку?
4. Запишіть розрахункову формулу, за яких умов 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?

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. 3.2. Стічні води скидаються у середині потоку на дні.

Таблиця 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 фоновою 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 на дні.

Рішення.

1) $\delta = 0,30 / 0,22 = 1,36$ (м²).

2) $b = h = (1,36)^{1/2} = 1,17$ (м).

3) $\Delta y = \Delta z = 0,55$ (м).

4) $D = 9,8 * 2,10 * 0,22 / 30 / (0,7 * 30 + 6) = 0,0056$ (м²/с).

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

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

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

8) Розрахунок поля концентрацій виконуємо у перевищеннях над фоном (рис. 3.1): $C_{CT}^{(IP)} = 125 - 3 = 122$ (мг/дм³); $C_E^{(IP)} = 3 - 3 = 0$.

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

Висновок. На відстані $5\Delta x = 7,6$ (м) від місця скиду стічних вод максимальна концентрація речовини складає $66,2+3,0 = 69,2$ (мг/дм³) при ширині зони забруднення $12\Delta z = 12*0,55 = 6,6$ (м).

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. 285 с.

поверхня k = 0

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

дно $\Sigma = 488$

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 $\Sigma = 488$

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 $\Sigma = 488$

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 $\Sigma = 488$

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 $\Sigma = 488$

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 $\Sigma = 488$

Рис. 3.1 Розрахунок дифузії забруднювальної речовини у потоці

4 РОЗРАХУНОК РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РЕЧОВИНИ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ПРИ АВАРІЙНИХ РОЗЛИВАХ (ЦИЛІНДРИЧНІ КООРДИНАТИ)

4.1 Основні положення

Об'єм забруднення у товщі води представлений у вигляді циліндра, тобто на поверхні води пляма має форму кола. Початок системи координат розташовано в центрі плями незалежно від того, чи залишається пляма на місці чи переміщується під дією течії й вітру. Перенесення плями по акваторії відбувається за рахунок адвекції, а переміщення речовини в плямі – турбулентної дифузії.

В середньому перенесення речовини в плямі відбувається рівномірно у всі боки від центра вздовж радіуса. Поперек радіуса результуючий перенос дорівнює нулю. У зв'язку з цим, концентрація речовини змінюється тільки вздовж радіусів, а на колах із центром у початку координат вона постійна.

Розрахунок виконується за формулою (4.1)

$$C_{k+1,n} = (0,5 + k_H \Delta t) C_{k,n} + 0,25(bC_{k,n+1} + dC_{k,n-1}), \quad (4.1)$$

де Δt – крок у часі; $b=2n/(2n-1)$; $d=2(n-1)/(2n-1)$;
за умови $\Delta t = \Delta r^2/(4D)$ і $(0,5 + \Delta t k_H) > 0$.

При розливі консервативної речовини ($k_H = 0$) формула (4.1) буде мати вигляд:

$$C_{k+1,n} = 0,5C_{k,n} + 0,25(bC_{k,n+1} + dC_{k,n-1}). \quad (4.2)$$

4.2 Вихідні дані для розрахунку

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

W_0 – об'єм розливу, м³;

k_H – характеристика розкладання розливої речовини, 1/с;

C_0 і C_E – початкова і фонові концентрації речовини, мг/дм³;

H_C – середня глибина на акваторії, м;

V_C – середня швидкість течії, м/с;

D – коефіцієнт турбулентної дифузії, м²/с.

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 :

$$r_0 = (W_0/\pi H_C)^{0,5}. \quad (4.3)$$

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

$$\Delta r = r_0/n_0; \quad n_0 = 1, 2, 3, \dots \quad (4.4)$$

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

$$\Delta t = \Delta r^2/(4D); \quad (4.5)$$

$$b = 2n/(2n-1); \quad (4.6)$$

$$d = 2(n-1)/(2n-1). \quad (4.7)$$

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

4. Розрахунок ведеться у табличному вигляді (табл. 4.1). В n_0 перших кілець, починаючи від центра плями, записується початкова концентрація C_0 . За формулою (4.7) або (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:

$$C_0 n_0^2 = \sum C_{ki} (2i-1). \quad (4.8)$$

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

Контрольні запитання

1. Запишіть модель розповсюдження речовини при аварійних розливах.
2. Запишіть розрахункову формулу, за яких умов вона виконується.
3. Які дані необхідні для розрахунку розводження аварійних розливів речовини?
4. Як визначається розмір кілець?
5. Яка послідовність розрахунку?
6. Як виконується контроль розрахунку?

Завдання для самостійної роботи

Розрахувати поле концентрації забруднювальної речовини у плямі через період часу $10\Delta t$, табл. 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 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 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. 4.2 в перший стовпець ($k=0$) у кільця з номерами 1 і 2 записуємо 98, в інші – 0.

Розрахунок дифузії плями, табл. 4.2 виконується за формулою (4.2):

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

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

ВИСНОВОК. З табл. 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. Юрасов С.М. Частина 2. Моделювання та прогнозування стану водного середовища / Конспект лекцій. Одеса: ОДЕКУ, 2019. 42 с.

Таблиця 4.2 - Розрахунок дифузії плями забруднення ($\Delta r = 3,35$ м, $\Delta t = 15,0$ хв.)

n	$2n-1$	b	d	Концентрація речовини у кільцях плями в різні моменти часу ($C_{k,n}$), мг/дм ³										
				$k=0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0,500000	0,000000	98,0000	98,0000	81,6667	68,6000	58,8000	51,3333	45,5000	40,8333	37,0222	33,8545	31,1818
2	3	0,333333	0,166667	98,0000	65,3333	55,5333	49,0000	43,8667	39,6667	36,1667	33,2111	30,6869	28,5091	26,6131
3	5	0,300000	0,200000	0,0000	19,6000	22,8667	23,8000	23,8000	23,3333	22,6333	21,8273	20,9859	20,1483	19,3357
4	7	0,285714	0,214286	0,0000	0,0000	4,2000	7,0000	8,8667	10,1111	10,9242	11,4333	11,7265	11,8657	11,8951
5	9	0,277778	0,222222	0,0000	0,0000	0,0000	0,9333	2,0222	3,0404	3,9242	4,6639	5,2693	5,7566	6,1434
6	11	0,272727	0,227273	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2121	0,5657	0,9872	1,4277	1,8580	2,2615	2,6304
7	13	0,269231	0,230769	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0490	0,1550	0,3084	0,4949	0,7014	0,9171
8	15	0,266667	0,233333	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0114	0,0419	0,0936	0,1653	0,2537
9	17	0,264706	0,235294	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0027	0,0112	0,0278	0,0536
10	19	0,263158	0,236842	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0006	0,0030	0,0081
11	21	0,261905	0,238095	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0008
12	23	0,260870	0,239130	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Σ				392,000	392,000	392,000	392,000	392,000	392,000	392,000	392,000	392,000	392,000	392,000

5 РОЗРАХУНОК РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РЕЧОВИНИ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ПРИ АВАРІЙНИХ РОЗЛИВАХ (ПРЯМОКУТНІ КООРДИНАТИ)

5.1 Основні положення

Основна розрахункова формула має вигляд:

$$C_{k+1,n,m} = a(C_{k,n,m+1} + C_{k,n+1,m} + C_{k,n-1,m} + C_{k,n,m-1}) + (1 - k_H \Delta t - 4a)C_{k,n,m}, \quad (5.1)$$

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

При контакті з берегом (при відсутності відтоку нафти на берег):

$$C_{k+1,n,m} = a(C_{k,n+1,m} + C_{k,n,m+1} + C_{k,n,m-1}) + (1 - k_H \Delta t - 3a)C_{k,n,m}. \quad (5.2)$$

При наявності відтоку нафти на берег

$$C_{k+1,n,m} = a(C_{k,n+1,m} + C_{k,n,m+1} + C_{k,n,m-1} - q\Delta z/D) + (1 - k_H \Delta t - 3a)C_{k,n,m}. \quad (5.3)$$

Формули (5.1)-(5.3) можна спростити, взявши $a = 0,125$, тоді:

$$C_{k+1,n,m} = 0,125(C_{k,n,m+1} + C_{k,n+1,m} + C_{k,n-1,m} + C_{k,n,m-1}) + (0,5 - k_H \Delta t)C_{k,n,m}, \quad (5.4)$$

при $\Delta t = \Delta z^2 / (8D)$.

5.2 Вихідні дані для розрахунку

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

W_0 або M_0 – об'єм розливу або його маса, м³ або т;

k_H – характеристика розкладання розливої нафти, 1/с;

H_C – середня глибина на акваторії, м;

V_B – середня швидкість вітру, м/с;

ρ_H і ρ_B – густина нафти і води, т/м³;

C – коефіцієнт Шезі, м^{0,5}/с.

5.3 Послідовність розрахунку

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

$$r_H = (W_0 / \pi / 0,1)^{0,5} = (M_0 / \rho_H / \pi / 0,1)^{0,5}. \quad (5.5)$$

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

$$D_0^3 = D_H^3 + 24K_B t W_0 (\rho_B - \rho_H) \rho_H / \pi / \rho_B, \quad (5.6)$$

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

3. За величиною r_0 визначається довжина сторони b рівновеликого квадрата:

$$b = (\pi)^{0,5} r_0. \quad (5.7)$$

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:

$$\Delta t = \Delta z^2 / (8D). \quad (5.8)$$

6. Коефіцієнт турбулентної дифузії розраховується за формулою:

$$D = gHV_T / (M C), \quad (5.9)$$

$$0,7C + 6, \quad \text{при } C < 60;$$

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

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:

$$V_T = k_B V_B (3 + 10h)^{0,5}, \quad (5.10)$$

де k_B – коефіцієнт, який залежить від коефіцієнта Шезі C , визначається за табл. 5.1;

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

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

Таблиця 5.1 – Визначення значення k в залежності від коефіцієнта Шезі C

C	10	20	30	40	50	60	80	90	1000
k_B	0,0010	0,0018	0,0027	0,0034	0,0042	0,0050	0,0060	0,0064	0,0068

8. Розраховується початкова концентрація C_0 :

$$C_0 = W_0 * \rho_H / b^2. \quad (5.11)$$

9. В n_0^2 клітинок, починаючи від центра плями, записується початкова концентрація C_0 . Далі за формулою (5.21) розраховується

концентрація речовини в наступний момент часу (через Δt). Розрахунок ведеться покрокове 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 постійна (дорівнювати $n_0^2 C_0$).

11. При необхідності врахування випаровування нафти виконується за формулою :

$$C=C^*\{1-\delta u[1-\exp(-kt)]\}, \quad (5.12)$$

де C – концентрація нафти з урахуванням випаровування, $г/м^2$;
 C^* – концентрація нафти без урахування випаровування, $г/м^2$;
 δu – об'єм повного випарювання легких фракцій по відношенню до початкового об'єму, в частках одиниці;
 $k = \ln 2/\tau$;
 τ – інтервал часу, за який відбувається випарювання половини легких фракцій (поза аналогією з періодом напіврозпаду).

Контрольні запитання

1. Запишіть модель розповсюдження речовини при аварійних розливах у прямокутних координатах.
2. Запишіть розрахункову формулу, за яких умов вона виконується?
3. Які дані необхідні для розрахунку розводження аварійних розливів речовини?
4. Як визначається розмір клітинок?
5. Яка послідовність розрахунку?
6. Як виконується контроль розрахунку?

Завдання для самостійної роботи

Розрахувати поле концентрацій забруднювальної речовини у плямі через період часу $5\Delta t$ (табл. 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 5.2 – Вихідні дані за варіантами

Показник	Значення показників по варіантах									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$M_0, \text{т}$	10	12	8	16	6	15	18	4	5	2
$D, \text{м}^2/\text{с}$	0,015	0,020	0,035	0,040	0,042	0,012	0,018	0,018	0,036	0,035
$\rho_H, \text{т}/\text{м}^3$	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$\rho_B, \text{т}/\text{м}^3$	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, $D=0,013 \text{ м}^2/\text{с}$; густина нафти $\rho_H=0,85 \text{ т}/\text{м}^3$ і води $\rho_B=1,02 \text{ т}/\text{м}^3$.

Рішення.

1. Радіус плями одразу після розливу дорівнює:

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

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

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

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:

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

На рис. 5.2 при $k = 0$ у шістнадцять клітинок записується значення початкової концентрації $C_0 = 282 \text{ г}/\text{м}^2$.

Розрахунок дифузії плями (рис. 5.2) виконується за формулою (5.21) при $k_H = 0$:

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

В усі моменти часу контрольна сума концентрацій речовини повинна дорівнювати $282 * 4^2 = 4512 \text{ (мг}/\text{дм}^3\text{)}$.

Висновок. По рис. 5.2 видно, що через $5\Delta t = 5 * 8,32 = 41,6$ години після розливу максимальна концентрація речовини у плямі дорівнює $231 \text{ (мг}/\text{дм}^3\text{)}$, ширина плями складає $14\Delta x = 14 * 55,8 = 781 \text{ (м)}$ та її площа – $0,349 \text{ км}^2$.

Перелік посилань

1. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод./Под ред. А.В.Караушева. Изд. 2-ое. Л.: Гидрометеиздат, 1987.285 с.

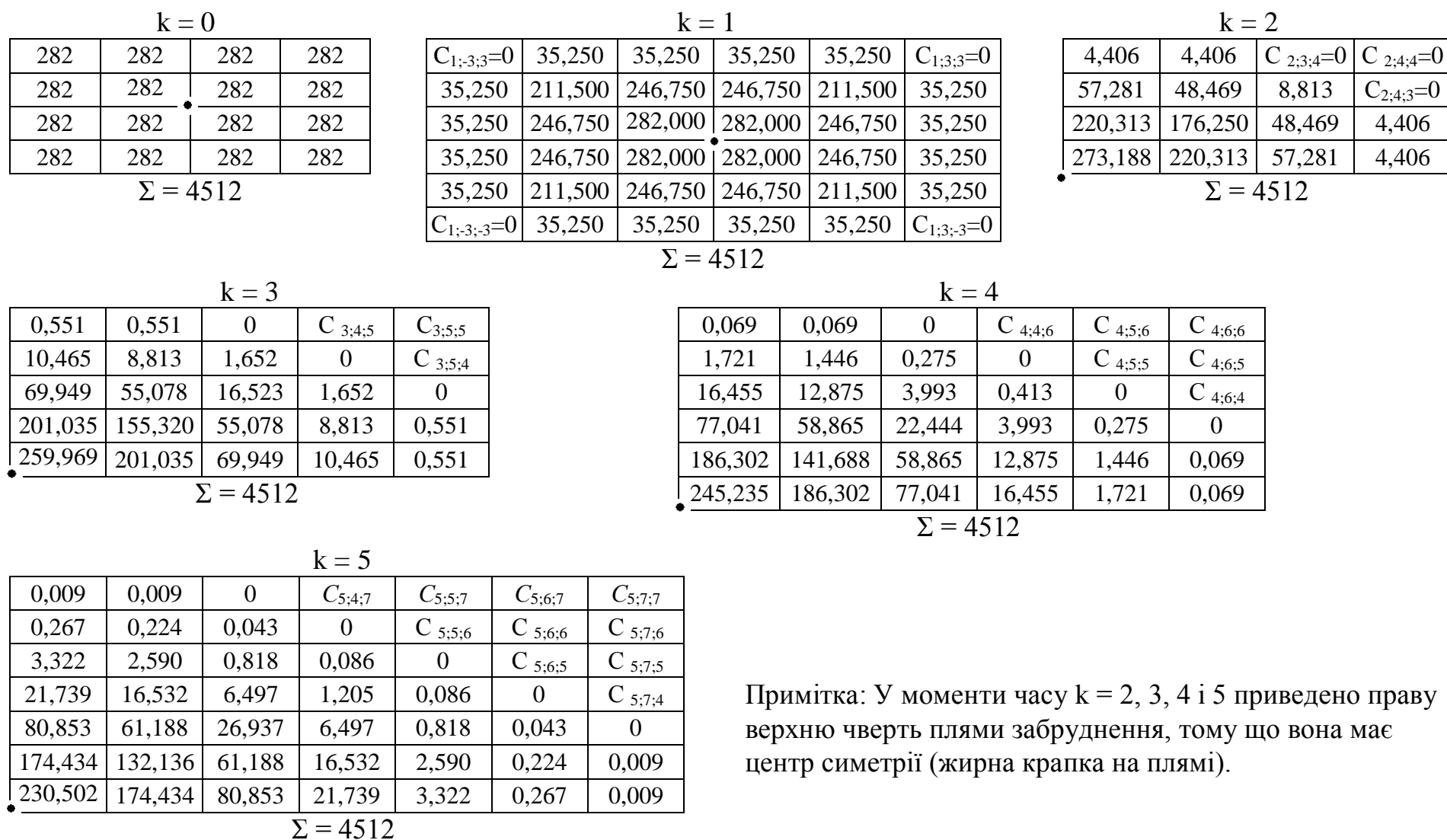


Рис. 5.2 Розрахунок дифузії плями забруднення

6 СПРОЩЕНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ РОЗВОДЖЕННЯ СТІЧНИХ ВОД В ПОТОКАХ

Спрощені методи розрахунку розводження стічних вод у потоках базуються 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 порівняється велика кількість варіантів будівництва об'єкта. Одержані цими методами результати розглядаються як орієнтовні. В подальшому їх необхідно відкоректувати за допомогою детальних розрахунків.

6.1 Метод УралНДІВГ

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

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

$$C_i = Q_{CT} C_{CT} \exp[-(Y^2 + Z^2)/(PX^{3/2}) + k_H X/V] / [4\pi V P X^{3/2} \Phi(\xi_1/2) \Phi(\xi_2/2)] + C_E \exp[k_H X/V]. \quad (6.1)$$

6.1.2 Береговий випуск (початок координат у точці випуску):

$$C_i = Q_{CT} C_{CT} \exp[-(Y^2 + Z^2)/(PX^{3/2}) + k_H X/V] / [\pi V P X^{3/2} \Phi(\xi_3/2) \Phi(\xi_4/2)] + C_E \exp[k_H X/V]. \quad (6.2)$$

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

$$C_i = Q_{CT} C_{CT} \exp\{-[(Y+h-0,5H)^2 + (Z+b-0,5B)^2]/PX^{3/2} + k_H X/V\} / \{\pi V P X^{3/2} [\Phi(\xi_5/2) + \Phi(\xi_6/2)] [\Phi(\xi_7/2) + \Phi(\xi_8/2)]\} + C_E \exp[k_H X/V]. \quad (6.3)$$

де C_i – концентрація забруднювальної речовини (мг/дм³) у точці с координатами X (відстань уздовж потоку від джерела забруднення) Y (глибина) і Z (ширина);

Q_{CT} – витрата стічних вод, які надходять до річки, м³/с;

C_{CT} – концентрація забруднювальної речовини у стічних водах, мг/дм³;

B – середня ширина потоку, м;

H – середня глибина потоку, м;
 V – середня швидкість річки, м/с;
 k_H – коефіцієнт не консервативності, 1/с;
 C_E – фонові концентрація речовини, мг/дм³;
 $\Phi(\xi/2)$ – інтеграл імовірності, визначається з табл. 6.1;
 P – розмірний коефіцієнт пропорційності, розраховується за

формулою:

$$P = 0,026 B^{1/2} (2g)^{1/4} / (CH^{3/4}); \quad (6.4)$$

$$\xi_1 = B / [(2P)^{1/2} X^{3/4}]; \quad \xi_2 = H / [(2P)^{1/2} X^{3/4}]; \quad (6.5)$$

$$\xi_3 = B(2)^{1/2} / [P^{1/2} X^{3/4}]; \quad \xi_4 = H(2)^{1/2} / [P^{1/2} X^{3/4}]; \quad (6.6)$$

$$\xi_5 = b(2)^{1/2} / [P^{1/2} X^{3/4}]; \quad \xi_6 = (B-b)(2)^{1/2} / [P^{1/2} X^{3/4}]; \quad (6.7)$$

$$\xi_7 = h(2)^{1/2} / [P^{1/2} X^{3/4}]; \quad \xi_8 = (H-h)(2)^{1/2} / [P^{1/2} X^{3/4}]. \quad (6.8)$$

Відстань до перерізу достатнього перемішування (співвідношення C_{MAX} і C_{MIN} не більш 1,25) визначається за формулами:

$$X_D = \{(H^2 + B^2) / [4P \ln(C_{MAX}/C_{MIN})]\}^{2/3}; \quad (6.9)$$

$$X_D = \{(H^2 + B^2) / [P \ln(C_{MAX}/C_{MIN})]\}^{2/3}; \quad (6.10)$$

$$X_D = \{[(H-h)^2 + (B-b)^2] / [P \ln(C_{MAX}/C_{MIN})]\}^{2/3}. \quad (6.11)$$

Формули (6.1)–(6.3) застосовуються у випадках, які згадані у п.п. 6.1.1–6.1.3.

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

Таблиця 6.1 Інтеграл ймовірності $\Phi(\xi/2)$

$\Phi(\xi/2)$	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

Кінець табл. 6.1

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

6.2 Метод Таллінського політехнічного інституту (ТПІ)

Метод засновано на аналітичному розв'язанні рівняння турбулентної дифузії відповідно до найпростішого випадку. Метод дозволяє розрахувати максимальну концентрацію неконсервативної речовини у будь-якому заданому перерізі.

6.2.1 Випуск знаходиться на відстані b від берега

$$C_{MAX}=C_E+(Q_{CT}C_{CT})exp[k_H X/V]/[H(\pi V D_Z X)^{1/2}]/[\Phi(\xi_1 2^{1/2})+\Phi(\xi_2 2^{1/2})], \quad (6.12)$$

де $\Phi(\xi 2^{1/2})$ – інтеграл ймовірності, визначається по табл. 6.2;

$$\xi_1 = -bV^{1/2}/[2(D_Z X)^{1/2}]; \quad \xi_2 = (b-B)V^{1/2}/[2(D_Z X)^{1/2}]. \quad (6.13)$$

6.2.2 Випуск знаходиться біля берега

$$C_{MAX}=C_E+(Q_{CT}C_{CT})exp[k_H X/V]/[H(\pi V D_Z X)^{1/2}]/\Phi(\xi_3 2^{1/2}), \quad (6.14)$$

де $\xi_3 = BV^{1/2}/[2(D_Z X)^{1/2}]. \quad (6.15)$

6.2.3 Випуск знаходиться у середині потоку

$$C_{MAX}=C_E+(Q_{CT}C_{CT})exp[k_H X/V]/[2H(\pi V D_Z X)^{1/2}]/\Phi(\xi_4 2^{1/2}), \quad (6.16)$$

де $\xi_4 = BV^{1/2}/[4(D_Z X)^{1/2}]; \quad (6.17)$

D_Z – коефіцієнт дисперсії у поперечному напрямку (інші позначення ті ж, що і у п. 6.1).

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

$$D_z = 41,6Ru_*/(Re)^{1/2}, \quad (6.18)$$

де R – гідравлічний радіус, м;

u_* – динамічна швидкість потоку, м/с, розраховується за формулою

$$u_* = (gRI)^{1/2} = V(g/C)^{1/2}; \quad (6.19)$$

Таблиця 6.2 Інтеграл ймовірності $\Phi[\xi 2^{1/2}]$

$\Phi(\xi 2^{1/2})$	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, м^{0,5}/с;

Re – число Рейнольдса, розраховується за формулою

$$Re = RV/\nu, \quad (6.20)$$

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості води, м²/с.

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

$$D_z = (HV/3524)(B/H)^{1,378}. \quad (6.21)$$

Автори обмежують застосовність методу випадками порівняно невеликих водотоків з коефіцієнтом звивистості меншим від 1,5.

6.3 Експрес–метод ДГІ

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

Як характеристику концентрації забруднювальної речовини в будь-якому загальному перерізі взято величину χ , яку названо показником розводження:

$$\chi = (C_{MAX} - C_{II}) / C_{CT}, \quad (6.22)$$

де C_{II} – концентрація речовини у перерізі достатнього перемішування.

Показник χ використовується як при постійній, так і при змінній витраті води на ділянці, що розглядається.

Відстань до заданого значення χ визначається за формулою

$$X = 0,14 Q_{CT} B (N/\hat{H})^{1/2} / [\chi \varphi (Q_{CT} + Q_E)], \quad (6.23)$$

де $N = MC/g$;

C – коефіцієнт Шезі;

$$M = \begin{cases} 0,7C + 6, & \text{при } C < 60; \\ 48, & \text{при } C \geq 60. \end{cases} \quad (6.24)$$

$\hat{H} = H/B$ – відносна глибина;

$\varphi = l_\varphi / l_{PP}$ – показник звивистості;

l_φ – довжина ділянки по фарватеру, км;

l_{PP} – довжина цієї ж ділянки по прямий, км.

Вирішуючи рівняння (6.23) відносно величини зворотної кратності розводження ($1/n = C_{MAX}/C_{CT}$), одержуємо:

$$C_{MAX}/C_{CT} = C_{II}/C_{CT} + 0,14 Q_{CT} B (N/\hat{H})^{1/2} / [\chi \varphi (Q_{CT} + Q_E)]. \quad (6.25)$$

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_{MAX} розраховується за формулою:

$$C_{MAX} = C_E + (C_{CT} - C_E) / n, \quad (6.26)$$

де $n=(C_{CT}-C_E)/(C_{MAX}-C_E)$ – показник кратності розводження.
Величина n пов'язана з коефіцієнтом змішування γ залежністю

$$n=(Q_{CT}-\gamma Q_E)/Q_{CT}. \quad (6.27)$$

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

$$\gamma=(1-\beta)/(1+\beta Q_E/Q_{CT}), \quad (6.28)$$

де $\beta=\exp(-aX^{1/3}); \quad (6.29)$

$$a=\zeta\varphi(D/Q_{CT})^{1/3}; \quad (6.30)$$

X – відстань по фарватеру від місця скиду стічних вод до перерізу, 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;

$$D=gHV/(MC); \quad (6.31)$$

C – коефіцієнт Шезі;

M – коефіцієнт, розраховується за формулою (6.24).

Для наближеного визначення відстані до перерізу достатнього змішування пропонується формула:

$$X_{II}=\{(1/a)\ln[(1+\gamma Q_E/Q_{CT})/(1-\gamma)]\}^3. \quad (6.32)$$

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 ...).

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 методу ТПІ?
7. Які величини розраховуються за допомогою методу ДГІ?
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. Виразити цю відстань у метрах. Визначити максимальну концентрацію домішки у створі на відстані 10 Δx. Оформлену роботу подати до захисту. Робота повинна містити: розрахункові формули, вихідні дані, результати розрахунку у вигляді схеми. Вихідні дані для роботи наведені у табл. 6.3.

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

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 (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 (6.5) розраховуємо ξ_1 й ξ_2 і визначаємо нормовані функції Лапласа $\Phi(\xi/2)$ по табл. 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 (6.1) розраховуємо C_{MAX} :

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

2. Розрахунок методом ТПІ

Вихідні дані ті ж, що і у прикладі 1.

Рішення.

а) Розраховуємо коефіцієнт D_Z за формулою (6.18):

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

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

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

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

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

б) Визначаємо інтеграл імовірності $\Phi(\xi_2^{1/2})$ за формулою (6.17) і табл. 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 (6.16):

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

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_{II} :

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

г) Розраховуємо C_{MAX} :

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

4. Розрахунок методом ВОДГЕО

Вихідні дані ті ж, що і у прикладі 1.

Рішення.

а) Визначаємо D за формулою (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 (6.30):

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

в) коефіцієнт γ знаходимо за формулою (6.28), попередньо визначивши за формулою (6.29) коефіцієнт β :

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

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

г) Розраховуємо n :

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

д) Визначаємо C_{MAX} за формулою (6.26):

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

Перелік посилань

1. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод./Под ред. А.В.Караушева. Изд. 2-ое. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 285 с.

Навчальне видання

Юрасов Сергій Миколайович

З Б І Р Н И К
МЕТОДИЧНИХ ВКАЗІВОК
до практичних занять з дисципліни

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ

Частина 2

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ВОДНОГО
СЕРЕДОВИЩА**

Підп. до друку
Умовн. друк. арк.

Формат
Тираж

Папір
Зам. №

Надруковано з готового оригінал-макета

Одеський державний екологічний університет
65016, Одеса, вул.Львівська, 15
