

УДК 628.394

О.С. ПЕТРЕНКО, кандидат технічних наук  
Київський національний університет будівництва і архітектури

## **ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ РОЗБАВЛЕННЯ СТІЧНИХ ВОД У РІЧКАХ ЗА МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ РІЗНИЦЬ**

*Показано вплив різних факторів на розрахунок за методом скінченних різниць розбавлення стічних вод, що скидаються у річки. Приведені рекомендації щодо побудови розрахункової сітки, підвищення точності обчислень показників якості води і розбавлення та зменшення їх обсягів.*

**Ключові слова:** скид стічних вод, водовипускні споруди, зосереджений випуск стічних вод, розбавлення, метод скінченних різниць.

*Показано влияние разных факторов на расчет методом конечных разностей разбавления сточных вод, которые сбрасываются в реки. Приведены рекомендации по построению расчетной сетки, повышению точности вычислений показателей качества воды и разбавления, уменьшения их объема.*

**Ключевые слова:** сброс сточных вод, водовыпускные сооружения, сосредоточенный выпуск сточных вод, разбавление, метод конечных разностей.

*The influence to other factors of analysis of dilution waste water, which go out to rivers, by finite differences method. Given recommendations to create the computational grid, improve the accuracy of calculations of indicators water quality and dilution, computing decrease.*

**Key words:** waste water discharge, water-discharge buildings, concentrated waste water outlet, dilution, finite differences method.

Швидке змішування скидаємих стічних вод, як правило, з *більш чистими* водами водотоків дозволяє суттєво зменшити розміри ділянки небезпечного забруднення останніх та простіше виконати умови щодо показників якості в контрольному створі (КС), відстань  $\ell_{\text{КС}}$  до якого від впускних споруд (довжина ділянки розбавлення (ДР)) не повинна перевищувати 500 м [1].

Характеристикою інтенсивності вище вказаного змішування є **кратність розбавлення** – величина, яка показує в скільки разів води річки розбавляють стічні води на ДР. Знаходиться вона з виразу:

$$n = \frac{C_{\text{СК}} - C_{\text{Ф}}}{C_{\text{КС}} - C_{\text{Ф}}}, \quad (1)$$

де  $C_{\text{СК}}$ ,  $C_{\text{КС}}$  – відповідно значення будь-якого показника якості в скидаємих стічних водах та в КС (рис. 1А), г/м<sup>3</sup>;  $C_{\text{Ф}}$  – фонові значення відповідного показника якості річкової води, тобто до скидання стічних вод, г/м<sup>3</sup>.

Значення  $C_{\text{КС}}$  в різних місцях КС мають неоднакову величину (епюри на рис. 2А, Б). *Максимальні* з них знаходяться на *осі потоку*, яка проходить через випуск стічних вод за напрямом швидкості течії та перетинає КС по нормалі.

Навколо цієї осі рухається *основна маса суміші* стічних вод і вод водотоку. Саме максимальні значення показників якості порівнюються з гранично-допустимими значеннями цих показників в КС і підставляються в формулу (1). Їм відповідають *мінімальні* значення кратності розбавлення  $n$ .

Універсальним методом розрахунку значень показників якості в різних отворах, зокрема в КС, є *метод скінченних різниць* (МСР) [2, 3, 5]. Він має ту перевагу, що може застосовуватися при будь-якій конфігурації берегів і ложа водного об'єкту (ВО), а також при будь-якому співвідношенні витрат стічних вод ( $q$ , м<sup>3</sup>/с) і води у водотоці ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с). Крім того МСР дозволяє встановити розмір і конфігурацію забрудненої зони у ВО та значення показників якості на окремих ділянках цієї зони. Але цей метод не набув широкого розповсюдження внаслідок того, що особливості його впровадження недостатньо вивчені, а головне, точність розрахунків за МСР залежить від обсяга проведених обчислень, який може бути вельми значним.

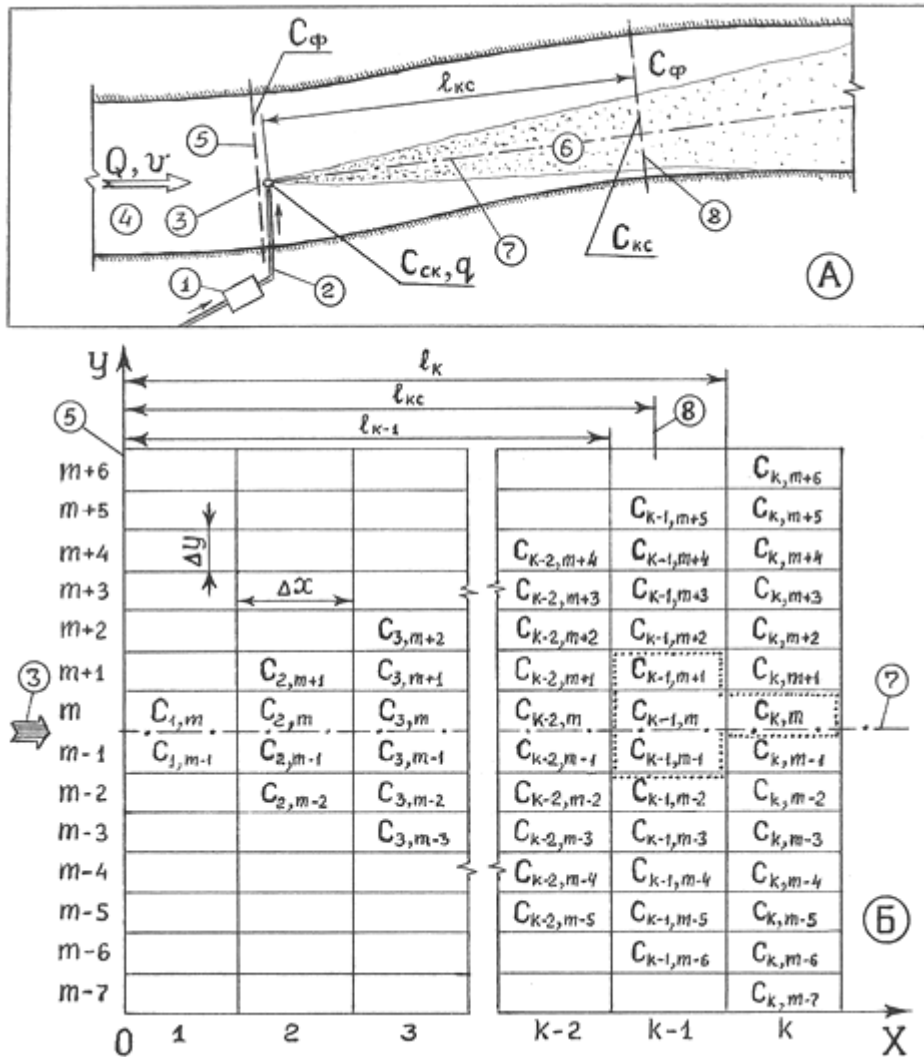


Рис. 1. Схема розташування споруд водоскидного тракту та розбавлення стічних вод у річці (А). Схема розрахункової сітки для реалізації метода скінченних різниць при знаходженні значень показників якості (Б). Крапками обведені клітинки, номери яких задіяні в формулах (5) і (19). В незаповнених клітинках знаходяться фонові значення  $C_{ф}$ .

1 – очисні споруди водовідведення; 2 – напірні і самопливні каналізаційні колектори або канали; 3 – зосереджений випуск стічних вод; 4 – річка; 5 – фоновий створ; 6 – ділянка розбавлення; 7 – вісь потоку суміші стічних вод і вод річки; 8 – контрольний створ

В даній роботі аналізується використання МСР при розрахунках витікання стічних вод в характерні водотоки через зосереджені руслові випуски. Далі вважаємо, що береги річки не впливають на рух забрудненої суміші.

Розглядаємо плоску задачу, використання якої рекомендується для водотоків з середньою глибиною  $H \leq 5$  м і для якої рівняння турбулентної дифузії у формі скінченних різниць має вигляд:

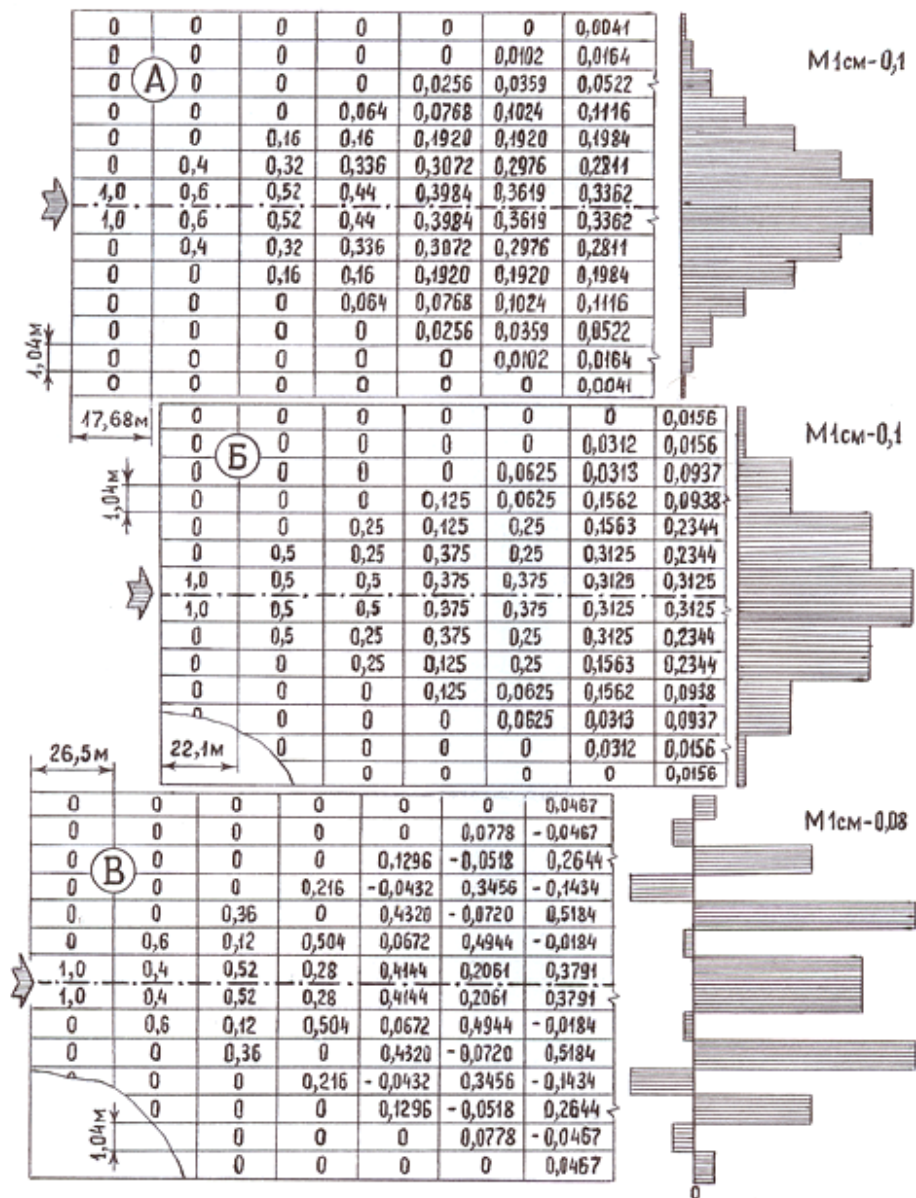


Рис. 2. Значення відносного показника якості ( $\bar{C}_{k,m} = C_{k,m} / C_{ck}$ ) в клітинах розрахункової сітки при вихідних даних II варіанту та значеннях  $q = 5 \text{ м}^3/\text{с}$ ,

$$\frac{\Delta_x C}{\Delta x} = \frac{gH}{2k_6 C_{III}} \cdot \frac{\Delta_y^2 C}{\Delta y^2}, \quad (2)$$

де  $k_6 = 22,3 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$  – коефіцієнт Бусінеска для води;  $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$  – прискорення вільного падіння;  $\Delta x, \Delta y$  – розміри інтервалів розбиття або клітинок плоскої сітки, відповідно, вздовж  $OX$  і  $OY$  (рис. 1Б), м;  $\Delta_x C, \Delta_y C$  – приріст значень показника якості, відповідно, вздовж  $OX$  і  $OY$ ,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;  $C_{III}$  – коефіцієнт Шезі, що знаходиться за формулою М.М. Павловського,  $\text{м}^{0,5}/\text{с}$ :

$$C_{III} = R^{y_c} / k_{III}, \quad (3)$$

де  $R$  – гідравлічний радіус, який для рівнинних річок приймається рівним  $H$ , м;  
 $k_{III}$  – коефіцієнт шорсткості ложа русла водотоку (береться з довідника);  $y_c$   
– показник ступеня, що розраховується за виразом:

$$y_c = 2,5\sqrt{k_{III}} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{k_{III}} - 0,1). \quad (4)$$

З рівняння (2) загальний вираз для знаходження значення показника якості в будь-якій клітинці сітки (рис. 1Б) матиме вигляд [ 2, 3, 5]:

$$C_{k,m} = a(C_{k-1,m+1} + C_{k-1,m-1}) + (1-2a)C_{k-1,m}, \quad (5)$$

де  $a$  – безрозмірний коефіцієнт сітки, значення якого може бути тільки додатнім:

$$a = \frac{g \cdot H \cdot \Delta x}{2k_{\delta} \cdot C_{III} \cdot \Delta y^2} = J \cdot \frac{H}{C_{III}} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta y^2} = G \frac{\Delta x}{\Delta y^2}. \quad (6)$$

В залежності (6) параметр  $J = g/2k_{\delta} = 9,81/2 \cdot 22,3 = 0,22$  (м<sup>0,5</sup>/с) є постійною величиною для води, а значення коефіцієнта водотоку  $G$  залежить від гідравлічних характеристик останнього і може визначатися з виразу:

$$G = \frac{J \cdot H}{C_{III}} = \frac{g \cdot H \cdot v}{2k_{\delta} \cdot C_{III} \cdot v} = \frac{D}{v}, \quad (7)$$

де  $v$  і  $D$  – відповідно на ДР, середня швидкість потоку води (м/с) та коефіцієнт турбулентної дифузії (м<sup>2</sup>/с):

$$D = \frac{g \cdot H \cdot v}{2k_{\delta} \cdot C_{III}}. \quad (8)$$

Далі будемо вважати коефіцієнт водотоку  $G$  практично незмінним для ДР довжиною  $l_{КС} = 500$  м даної річки.

Для зосередженого руслового випуску розрахунок починають вести з двох клітинок (рис. 1Б), для яких:

$$\Delta y = q / (2vH). \quad (9)$$

Рекомендують, щоб для величини  $\Delta y$  виконувалась умова:

$$\Delta y \leq 0,1 \cdot B, \quad (10)$$

де  $B$  – середня на ДР ширина русла, яка визначається за формулою, м:

$$B = Q / H \cdot v. \quad (11)$$

При невиконанні умови (10) значення  $\Delta y$  зменшується.

Максимальна кількість клітинок поперек потоку (по осі  $OY$ ) знаходиться з округленням до цілого числа з формули:

$$m_{max} \approx B / \Delta y. \quad (12)$$

Як видно з виразу (10) бажаним є виконання вимоги:  $m_{max} \geq 10$ .

Розмір інтервалів розбиття вздовж осі  $OX$  знаходять з виразу (6):

$$\Delta x = a \cdot \Delta y^2 / G. \quad (13)$$

Величина  $\Delta x$  визначає кількість клітин вздовж осі потоку до КС:

$$k_{КС} = \ell_{КС} / \Delta x. \quad (14)$$

Отримане число округляється до цілого значення в більший ( $k$ ) та менший ( $k-1$ ) бік. Знаходять відстані до ( $k-1$ )-ої та  $k$ -ої клітинки з формул (рис. 1Б):

$$\ell_{k-1} = \Delta x(k-1); \quad \ell_k = \Delta x \cdot k = \ell_{k-1} + \Delta x. \quad (15)$$

За виразом (5) для кожної розрахункової клітинки встановлюють значення показника якості та інтерполяцією знаходять *максимальне* значення цього показника в КС:

$$C_{КС} = C_{k-1,m} - \frac{(C_{k-1,m} - C_{k,m})(\ell_{КС} - \ell_{k-1})}{\Delta x}. \quad (16)$$

Кількість клітинок вздовж осі  $OY$  в останньому розрахунковому створі (при  $\ell_k$ ), для яких виконувались обчислення за виразом (5), становитиме:

$$m_k = 2k. \quad (17)$$

З рис 1Б видно, що *загальна кількість розрахункових клітинок* сітки визначатиметься, як

$$N_k = 0,5km_k = k^2. \quad (18)$$

Із залежності (13) витікає, що зміна значення  $\Delta y$  змінює довжину  $\Delta x$  в квадраті. Це суттєво позначається на величині  $N_k$ . Як приклад, при зменшенні  $\Delta y$  у двічі величина  $\Delta x$  зменшується в 4 рази, а з виразів (14), (17), (18) витікає, що  $N_k$  і, відповідно, обсяг розрахунків показника якості збільшиться в 16 разів.

**Послідовність розрахунку кратності розбавлення** складається з таких етапів:

- 1) за формулами (4), (3), (8), (7) знаходяться гідравлічні характеристики водотоку і його коефіцієнт  $G$ ;
- 2) з виразів (9), (11), (10) визначається ширина сітки  $\Delta y$ ;
- 3) приймається в першому наближенні кілька значень коефіцієнта сітки  $a$ ;
- 4) із залежності (13) знаходяться відповідні величинам  $a$  значення  $\Delta x$ , для яких з виразу (14) і після наступного округлення результату встановлюються кількості інтервалів розбиття вздовж осі  $OX$  ( $k_{КС}$ ,  $k$ ) та з формули (18) – загальні кількості розрахункових клітин  $N_k$ ;

- 5) після аналізу отриманих результатів вибирається таке значення  $\Delta x$ , якому відповідатиме, зручне для розрахунків, уточнене за виразом (6) значення  $a$ ;
- 6) розраховують за формулою (5) значення показника якості в кожній *задіяній* клітинці сітки;
- 7) знаходять за виразом (15) відстані  $l_{k-1}$  і  $l_k$  для двох останніх створів і виділяють, відповідні ним, максимальні значення показника якості  $C_{k-1,m}$  та  $C_{k,m}$  для визначення за формулою (16) значення  $C_{КС}$ ;
- 8) обчислюють значення кратності розбавлення  $n$  із залежності (1).

Найбільше впливає на точність розрахунків і їх обсяг *вибір оптимальних значень  $\Delta x$  та  $a$*  (5 етап). Для  $a = 0,5$  формула (5) має найпростіший вигляд:

$$C_{k,m} = 0,5(C_{k-1,m+1} + C_{k-1,m-1}). \quad (19)$$

При цьому значенні  $a$  досить часто мають місце випадки, коли  $k < 8 - 10$ , що суттєво зменшує точність розрахунків або коли  $k \gg 20$ , що при високій точності в рази, а буває і на порядки, збільшує обсяг необхідних обчислень. Для цих випадків слід підбирати *інші значення  $a$* . Задача *оптимізації* величини коефіцієнта сітки  $a$  і, відповідно, параметрів  $\Delta x$ ,  $k$  розглядається нижче на прикладі двох варіантів водотоків, вихідні дані і розрахункові характеристики яких наведені в таблиці 1. Показники першого варіанту відповідають *середнім*, а показники другого – *великим* рівнинним річкам України.

Якщо  $C_{СК} > C_{Ф}$ , то в процесі розбавлення стічних вод значення показника якості повинні поступово зменшуватись від клітинки до клітинки в напрямку течії та від осі потоку до берегів водотоку.

Ці тенденції чітко простежуються для усіх варіантів і випадків при значеннях  $a < 0,5$ . Як приклад, на рис. 2А для річки II варіанту показаний фрагмент розрахункової сітки при  $a = 0,4$ .

Для тих самих вихідних даних, але при  $a = 0,5$  (рис. 2Б), вздовж  $OX$  і  $OY$  спостерігається в сусідніх клітинах повторювання значень відносного показника якості, а по деяким прошкам вздовж  $OX$  і місцеве збільшення величини  $\bar{C}_{k,m}$ . В зв'язку з тим, що вздовж вказаних напрямків має місце загальна тенденція на зменшення значень  $\bar{C}_{k,m}$ , визначати  $C_{КС}$  при  $a = 0,5$  можна, але їх точність, в порівнянні з результатами при  $a < 0,5$ , буде меншою, особливо для малих значень  $k$ .

Таблиця 1

## Вихідні та розрахункові параметри характерних водотоків

| № пор. | Найменування вихідних даних і параметрів, які визначаються (в дужках – номера розрахункових формул) | Одиниці виміру      | Варіанти річок |        |
|--------|---|---------------------|----------------|--------|
|        |   |                     | I              | II     |
| 1      | Довжина ділянки розбавлення $\ell_{\text{КС}}$  | м                   | 500            | 500    |
| 2      | Середня глибина $H$ (гідравлічний радіус $R$ )  | м                   | 2              | 3      |
| 3      | Середня швидкість течії $v$   | м/с                 | 0,2            | 0,8    |
| 4      | Витрати води в річці $Q$  | м <sup>3</sup> /с   | 32             | 432    |
| 5      | Коефіцієнт Бусінеска для води $k_{\text{б}}$  | м <sup>0,5</sup> /с | 22,3           | 22,3   |
| 6      | Прискорення вільного падіння $g$  | м/с <sup>2</sup>    | 9,81           | 9,81   |
| 7      | Коефіцієнт шорсткості русла $k_{\text{ш}}$  | –                   | 0,04           | 0,05   |
| 8      | Показник ступеня $y_c$ (4)  | –                   | 0,264          | 0,269  |
| 9      | Коефіцієнт Шезі $C_{\text{ш}}$ (3)  | м <sup>0,5</sup> /с | 30             | 26,88  |
| 10     | Постійний для води параметр $J$   | м <sup>0,5</sup> /с | 0,22           | 0,22   |
| 11     | Коефіцієнт турбулентної дифузії $D$ (8)   | м <sup>2</sup> /с   | 0,0029         | 0,0196 |
| 12     | Коефіцієнт водотоку $G$ (7)   | м                   | 0,0146         | 0,0245 |
| 13     | Середня ширина водотоку $B$ (11)  | м                   | 5              | 5      |
| 14     | Умовне значення показника якості в місці скиду стічних вод $C_{\text{СК}}$                          | г/м <sup>3</sup>    | 80             | 180    |
| 15     | Умовне фонове значення показника якості в річці $C_{\text{ф}}$                                      | г/м <sup>3</sup>    | 100            | 100    |
|        |   |                     | 0              | 0      |

При значеннях коефіцієнта сітки  $a > 0,5$  (рис. 2В,  $a = 0,6$ ) коливання величини  $\bar{C}_{\text{к,т}}$  настільки значні, що спостерігаються навіть від'ємні її значення, а це неможливо в принципі. Тому користуватися значеннями  $a > 0,5$  при розрахунках недоцільно.

З наближенням значень  $a$  до нуля, як видно з виразів (13) і (14), зменшується розмір клітин  $\Delta x$  та зростає їх кількість  $k$  і, відповідно, точність розрахунку показників якості.

На рис. 3 показані графіки залежності максимальних значень вздовж осі потоку відносного показника якості ( $\bar{C}_{\text{к,т}} = C_{\text{к,т}} / C_{\text{СК}}$ ) в контрольному створі при  $\ell_{\text{КС}} = 500$  м та числа інтервалів розбиття вздовж осі  $OX$  на



ДР( $k$ ) від величини коефіцієнта сітки при значеннях  $a \leq 0,5$  і різних відносних витратах стічних вод ( $\bar{q} = q / Q$ ) для I (випадки 1-3) та II (випадки 4-7) розрахункових варіантів.

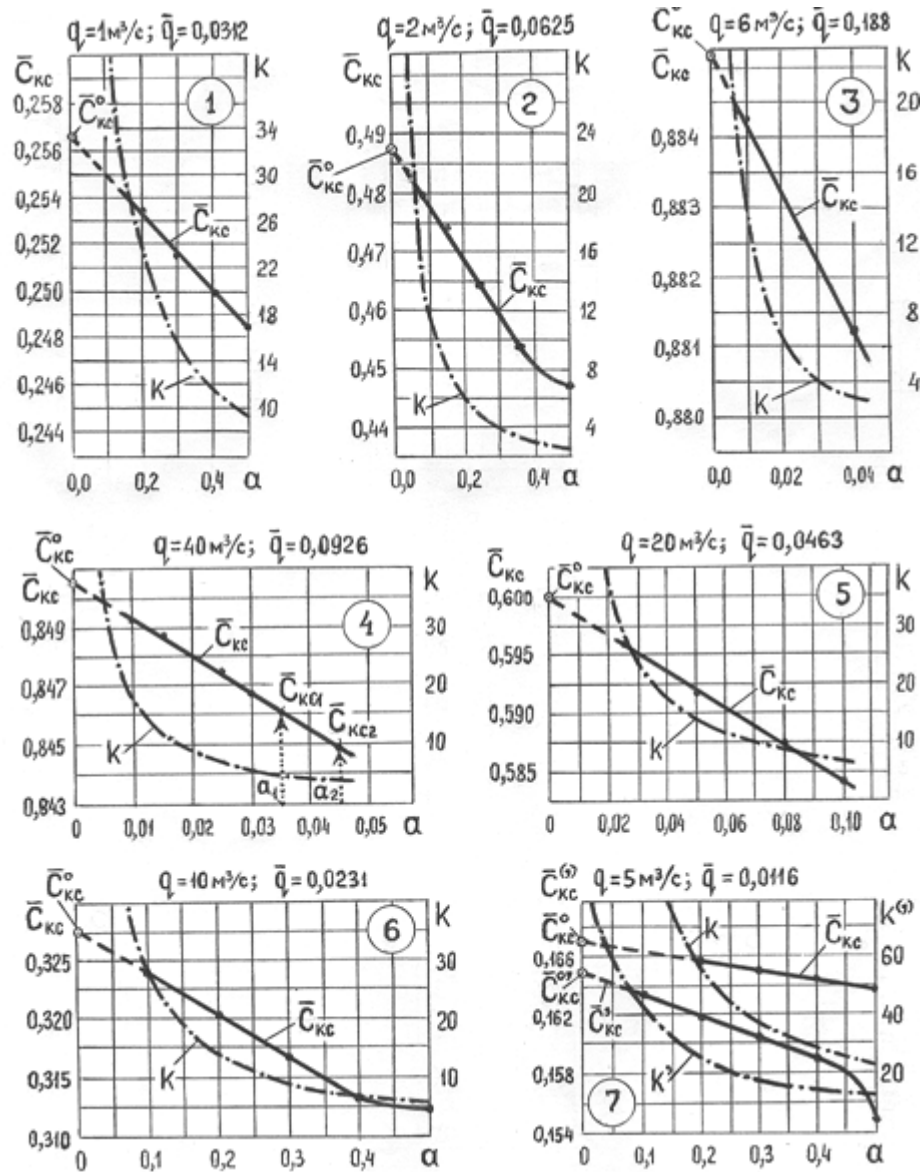


Рис. 3. Графіки залежностей  $\bar{C}_{kc} = f(a)$  та  $k = f(a)$  для першого (1-3 випадки) і другого (4-7 випадки) розрахункових варіантів. Пунктиром показана екстраполяція значень  $\bar{C}_{kc}$  в напрямку, що відповідає зменшенню коефіцієнта сітки  $a$  до нуля

Особливістю цих графіків є те, що залежність  $\bar{C}_{kc} = f(a)$  має чітко виражений **лінійний характер**. Відхилення від лінійності (випадки 2 і 6) спостерігаються тільки для деяких  $a = 0,5$  при *незначній* кількості інтервалів розбиття вздовж  $OX$  ( $k < 10-12$ ), що пояснюється вказаними вище і показаними на рис. 2Б коливаннями значень  $\bar{C}_{k,m}$ .

Лінійна залежність може бути виражена формулою:

$$\bar{C}_{\text{КС}} = b \cdot a + \bar{C}_{\text{КС}}^{\circ}, \quad (20)$$

де  $\bar{C}_{\text{КС}}^{\circ}$  – відносне найбільш точне значення показника якості в КС при  $a \approx 0$ ;  $b$  – параметр, який характеризує зменшення значення показника якості на інтервалі зміни коефіцієнта сітки  $a$  (від’ємна величина):  $a = 0,4$  (А),  $a = 0,5$  (Б),  $a = 0,6$  (В) і епюри цього показника для останнього створу (справа).

$$b = \frac{\bar{C}_{\text{КС}2} - \bar{C}_{\text{КС}1}}{a_2 - a_1}, \quad (21)$$

де  $a_1$  і  $a_2$  – вільно вибрані значення коефіцієнта сітки;  $\bar{C}_{\text{КС}1}$  і  $\bar{C}_{\text{КС}2}$  – відносні значення показника якості, які відповідають значенням  $a_1$  та  $a_2$  (як приклад, для випадку 4 на рис. 3 показано положення точок, які відповідають величинам  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $\bar{C}_{\text{КС}1}$ ,  $\bar{C}_{\text{КС}2}$ ).

Після визначення напрямків прямолінійних графіків функції  $\bar{C}_{\text{КС}} = f(a)$  з’являється можливість зробити їх екстраполяцію у бік зменшення величин  $a$  і отримати значення  $\bar{C}_{\text{КС}}^{\circ}$  при  $a \approx 0$ . У цьому разі величина  $k$  наблизатиметься до нескінченності, а точність розрахунків зростатиме, досягнувши *максимальної* при  $\bar{C}_{\text{КС}} = \bar{C}_{\text{КС}}^{\circ}$ . На графіках рис. 3 екстрапольована їх частина показана пунктиром, а самі значення  $\bar{C}_{\text{КС}}^{\circ}$  обведені.

Порівняння значень  $\bar{C}_{\text{КС}}$  при  $k = 10$  (випадки 1-6) та пр. при  $k = 25$  (випадок 7) з більш точними значеннями  $\bar{C}_{\text{КС}}^{\circ}$  показало, що *при малих  $k$*  величина відносного показника якості є *заниженою на 1-3%*.

У 7 випадку, крім визначення  $\bar{C}_{\text{КС}}$  при постійних значеннях  $\Delta x$ , наведені результати розрахунків відносної величини показника якості при укрупненні клітинок сітки на певному етапі цих розрахунків ( $\bar{C}_{\text{КС}}^{\circ}$ ). Розмір клітинок вздовж осі  $OY$  було збільшено до величини  $\Delta y' = 2\Delta y$ . Це, як видно з формули (13), збільшило розмір вздовж осі  $OX$  до  $\Delta x' = 4\Delta x$ . Укрупнення клітинок проводилось на такій відстані від випуску стічних вод, щоб їх кількість при розмірі  $\Delta x' \times \Delta y'$  приблизно дорівнювала кількості клітинок розміром  $\Delta x \times \Delta y$ , тобто  $N_{k'} \approx N_k$  або  $k' \approx k$ .

З графіків для 7 випадку видно, що значення  $\bar{C}_{\text{КС}}$  в порівнянні з  $\bar{C}_{\text{КС}}$  *занижені*, а точність їх менша на 4% при малих і на 2% – при великих значеннях  $k$ . Загальна кількість розрахункових клітинок сітки при вище наведеному її укрупненні ( $N'_k$ ), в порівнянні з випадком незмінних її розмірів ( $N_k$ ), *менша* у 3 рази для малих і у 5 разів – для великих значень  $k$ .

Залежність  $\bar{C}'_{\text{КС}} = f(a)$  також має лінійний характер крім початкової ділянки при  $a = 0,5$  та малих значень  $k$  ( $\leq 13$ ).

Порівняння значень  $\bar{C}'_{\text{КС}}$ , розрахованих при  $k = 15$ , з відносно точним значенням  $\bar{C}^{\circ}_{\text{КС}}$  показало, що при малих  $k$  величина відносного показника якості, розрахованого на дворозмірній сітці є заниженою на 3-4%, а значення  $\bar{C}'_{\text{КС}}$  менше  $\bar{C}^{\circ}_{\text{КС}}$  на 1,3%.

Визначення величин  $\bar{C}^{\circ}_{\text{КС}}$  або  $\bar{C}'_{\text{КС}}$  можна зробити не тільки графічною екстраполяцією але і меншими за обсягами *аналітичними* розрахунками. Як приклад, розглянемо випадок 4 на рис. 3. Для значень  $a_1 = 0,035$  і  $a_2 = 0,045$  при, відповідно, мінімальних значеннях  $k_1 = 4$  і  $k_2 = 5$  виконуємо розрахунок  $\bar{C}_{\text{КС}}$  в послідовності викладеній вище (1-7 етапи).

Після отримання значення  $\bar{C}_{\text{КС}1} = 0,8461$  і  $\bar{C}_{\text{КС}2} = 0,8448$  знаходимо за виразом (21) необхідний параметр:

$$b = \frac{0,8448 - 0,8461}{0,045 - 0,035} = -0,13.$$

Із залежності (20) отримуємо формулу, по якій розраховуємо точне відносне значення показника якості:

$$\bar{C}^{\circ}_{\text{КС}} = \bar{C}_{\text{КС}1} - ba_1 = 0,8461 - (-0,13) \cdot 0,035 = 0,85065$$

або

$$\bar{C}^{\circ}_{\text{КС}} = \bar{C}_{\text{КС}2} - ba_2 = 0,8448 - (-0,13) \cdot 0,045 = 0,85065.$$

Отримані значення практично *співпадають* з результатом графічної екстраполяції ( $\bar{C}^{\circ}_{\text{КС}} = 0,8506$ ).

*Абсолютне* максимальне значення показника якості в контрольному створі розраховуємо за виразом:

$$C_{\text{КС}} = \bar{C}^{\circ}_{\text{КС}} \cdot C_{\text{СК}} = 0,85065 \cdot 100 = 85,065 \text{ (г/м}^3\text{)}.$$

Визначаємо *кратність розбавлення* стічних вод на 500-метровій ділянці за формулою (1):

$$n = \frac{C_{\text{ск}} - C_{\text{ф}}}{C_{\text{кс}} - C_{\text{ф}}} = \frac{100 - 0}{85,065 - 0} = 1,18.$$

### Загальні висновки

1. Метод скінченних різниць є найбільш ефективним математичним інструментом для розв'язання рівняння турбулентної дифузії і визначення на підставі отриманих результатів величини кратності розбавлення.

2. Обсяг розрахунків за цим методом можна значно зменшити при забезпеченні необхідної точності, якщо визначити методом підбору *оптимальне* значення коефіцієнта сітки  $a$ . Для цього слід дотримуватись таких рекомендацій:

а) використовувати значення  $a < 0,5$  при мінімальній кількості інтервалів розбиття вздовж осі потоку ( $k \geq 5 - 10$ );

б) приймати  $a = 0,5$  тільки при  $k \geq 15 - 20$ ;

в) *уникати* застосування значень  $a > 0,5$ ;

г) остаточний результат – розрахункове значення показника якості ( $C_{\text{кс}}$ ) необхідно координувати множенням на 1-й поправочний коефіцієнт  $k_{\text{п1}} = 1,03 - 1,04$ .

3. Залежність максимальної величини показника якості від коефіцієнта сітки має *лінійний* характер, що дозволяє визначити положення прямолінійного графіка функції  $C_{\text{кс}} = f(a)$  при найменшій кількості розрахункових клітинок (значення  $k$  і  $N_k$ ), а потім *методом екстраполяції* знайти з *високою точністю* розрахункову величину  $C_{\text{ск}}$  (при  $a \rightarrow 0$ ) не проводячи додаткових обчислень на сітці. При використанні цього метода точність визначення  $C_{\text{ск}}$  *зростає* на 2-4% в порівнянні з розрахунками для малих  $k$ , а поправочний коефіцієнт не потрібен ( $k_{\text{п1}} = 1$ ).

4. В разі *зменшується* кількість розрахункових клітинок при одноразовому збільшенні їх величини за напрямом течії та рівенстві числа клітинок різних розмірів. В цьому випадку точність визначення  $C_{\text{ск}}$  при малих  $k$  (15-20) падає на 2-3%, що слід компенсувати введенням 2-го поправочного коефіцієнта ( $k_{\text{п2}} = 1,02 - 1,03$ ). Якщо для дворозмірної сітки величину  $C_{\text{ск}}$  визначати методом екстраполяції, то коефіцієнт  $k_{\text{п2}}$  слід зменшити до значення 1,015.

5. Впровадження частини або усіх вище вказаних заходів дозволить встановити загальну кількість клітинок розрахункової сітки на рівні  $N_k = 25 - 150$  при забезпеченні достатньої для потреб практики точності визначення показників якості в КС. *Загальний поправочний коефіцієнт* визначатиметься з формули:

$$k_{\Pi} = k_{\Pi 1} \cdot k_{\Pi 2}. \quad (22)$$

### Список літератури

1. *Правила* охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами. Затверджені постановою Кабінету Міністрів України від 25 березня 1999 р. № 465. К.: 1999. 4 с.
2. *Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод* / Под ред. А.В. Карашева. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 288 с.
3. *Лапшев Н.Н.* Расчеты выпусков сточных вод. М.: Стройиздат, 1977. 88 с.
4. *Інструкція* про порядок розробки та затвердження гранично допустимих скидів (ГДС) речовин у водні об'єкти із зворотними водами. Х.: УкрНЦОВ, ЮНИТЭП, 1994. 80 с.
5. *Петренко О.С.* Охорона водних ресурсів. Умови скиду стічних вод в поверхневі водні об'єкти: Навчальний посібник. К.: КНУБА, 2005. 144 с.

Надійшло до редакції 13.09.2016