

## **Перелік посилань**

1. П.Л. Иванов. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов. М: Высш. шк., 1991. – 267 с.
2. Ю.А. Химерик Проектирование и расчет гидротехнических сооружений. К.: Издательство Киевского университета, 1961. – 362 с.
3. Р.О. Корольков Формування оптимального кута закладення армованих укосів. Ж" Автошляховик України", №4 (186), 2005 р. - с. 40 – 41.
4. Хом'як А.Я., Юрчик Ю.В. Проектування земляного полотна в районах розповсюдження ярів. Вісник НТУ № 15, частина 2, 2007. – с.75-78.

УДК 628.218

**В.М. ЖУК**, канд. техн. наук

### **ЧАС КОНЦЕНТРАЦІЇ ТА МАКСИМАЛЬНА ВИТРАТА ДОЩОВИХ СТІЧНИХ ВОД З ПРЯМОКУТНИХ У ПЛАНІ БАСЕЙНІВ СТОКУ З ЛОТКОМ У НИЖНІЙ ЧАСТИНІ**

*У роботі представлено удосконалений метод гідравлічного розрахунку максимальної витрати та часу концентрації дощових стічних вод з прямокутних у плані басейнів стоку зі збірним лотком прямокутного поперечного перерізу, розташованим вздовж нижньої сторони басейна. Метод враховує взаємозв'язок між часом концентрації стічних вод та розрахунковою інтенсивністю дощу. Розроблено комп'ютерну програму для обчислення часу концентрації та розрахункової витрати дощового стоку залежно від значень вхідних параметрів.*

*В работе представлен усовершенствованный метод гидравлического расчета максимального расхода и времени концентрации дождевых сточных вод из прямоугольных в плане бассейнов стока со сборным лотком прямоугольного поперечного сечения, расположенным вдоль нижней стороны бассейна. Метод учитывает взаимосвязь между временем концентрации сточных вод и расчетной интенсивностью дождя. Разработана компьютерная программа для вычисления времени концентрации и расчетного расхода дождевого стока в зависимости от значений входных параметров.*

*The paper presents an improved method of hydraulic calculation of the peak discharge and time of concentration of the stormwater runoff from rectangular watersheds with collecting channel with rectangular cross-section, situated along the bottom side of the catchment. The method takes into account the relationship between time of concentration and design rainfall intensity. A computer program calculating the time of concentration and the peak storm water discharge, depending on the values of input parameters, is presented.*

Науково обґрунтоване визначення розрахункової максимальної витрати дощового стоку має велике значення при проектуванні мереж та споруд дощового водовідведення. На значення максимальної витрати дощових стічних вод впливають: розрахункові характеристики дощу (його тривалість та інтенсивність, період одноразового перевищення); параметри, що описують басейн стоку (конфігурація в плані, абсолютні розміри, висотна схема басейна стоку, вид землекористування, відсоток водонепроникних поверхонь,

характеристика водопроникних поверхонь, наявність безстічних ділянок території, висота шару початкового затримання, інфільтраційні властивості ґрунтів тощо) та характеристики системи водовідведення (конфігурація відкритої та закритої водовідвідної мережі, регулювальний вплив водовідвідних труб і каналів та спеціальних регулювальних споруд).

Складність та багатфакторність задачі обумовлюють наявність значної кількості наближень і припущень, що приймаються при математичному моделюванні взаємозв'язку «дощ – поверхневий стік», та, відповідно, великої кількості методів визначення максимальної витрати дощового стоку з урбанізованих територій. У вітчизняній інженерній практиці це питання регламентується вимогами нормативних документів [1, 2], за кордоном найчастіше використовуються методики [3, 4]. У роботі [5] було удосконалено метод визначення часу поверхневої концентрації дощового стоку з лінійних у плані однорідних басейнів стоку з постійним поздовжнім похилом та незмінним в часі та по площі коефіцієнтом стоку. Отримана розрахункова залежність

$$t_{con} = \frac{(1+z)(L_{con}n_1/\sqrt{i_o})^{1/(1+z)}}{(\psi_{mid}q_o)^{z/(1+z)}}, \quad (1)$$

де  $L_{con}$  – довжина шляху концентрації поверхневого потоку, м;  $n_1$  – коефіцієнт шорсткості поверхні;  $i_o$  – похил поверхні басейна стоку;  $\psi_{mid}$  – середнє значення коефіцієнта стоку;  $q_o$  – розрахункова інтенсивність випадання дощу,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $z$  – показник степеня, за формулою акад. Павловського  $z = 0,37 + 2,5\sqrt{n_1} - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n_1} - 0,1)$ , де  $R$  – гідравлічний радіус поверхневого потоку. Приймаючи, за Маннінгом  $z=2/3$ , отримуємо формулу

$$t_{con} = \frac{5L_{con}^{0,6}n_1^{0,6}}{3(\psi_{mid}q_o)^{0,4}i_o^{0,3}}, \quad (2)$$

що дуже подібна до аналогічної залежності методу кінематичної хвилі [6]:

$$t_{con} = \frac{L_{con}^{0,6}n_1^{0,6}}{(\psi_{mid}q_o)^{0,4}i_o^{0,3}}. \quad (3)$$

Застосовуючи для лінійного в плані однорідного басейна стоку принцип граничної інтенсивності, згідно з яким розрахункова інтенсивність дощу пов'язана з його тривалістю степеневою залежністю

$$q_o = \frac{A}{t_{\ddot{a}}^n}, \quad (4)$$

де  $A$  і  $n$  – параметри, які залежать від кліматичних особливостей регіону [1], та приймаючи  $t_d=t_{con}$ , у роботах [7, 8] було отримано залежність для визначення максимальної витрати дощового стоку для вищевказаних умов:

$$Q_r = (\psi_{mid} q_{20})^{\frac{1}{1-0,4n}} \left( \frac{3600 i_o^{0,3}}{5 n_1^{0,6} L_{con}^{0,6}} \right)^{\frac{n}{1-0,4n}} \cdot F, \text{ м}^3/\text{с} \quad (5)$$

де  $q_{20}$  – інтенсивність дощу,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , для даної місцевості тривалістю 20 хв. при  $P=1$  рік;  $F$  – площа басейна стоку,  $\text{м}^2$ .

Проте, залежність (5) не враховує конфігурації водовідвідної мережі, а розглядає басейн стоку як однорідний, з однаковим у всіх точках похилом у бік розрахункового перерізу.

Мета роботи – розробити удосконалений метод гідравлічного розрахунку максимальної витрати та часу концентрації дощових стічних вод з типових прямокутних у плані басейнів стоку зі збірним лотком прямокутного поперечного перерізу, розташованим вздовж нижньої сторони басейна.

### **Математична модель течії дощового стоку з прямокутного у плані басейна стоку з водозбірним лотком, розташованим вздовж його нижньої сторони**

Розглянемо типовий прямокутний у плані однорідний басейн стоку довжиною  $L_{can}$  та шириною  $L_{con}$  (рис. 1). Нехай поперечний похил у всіх точках басейна становить  $i_o$ , а поздовжній похил, з яким укладено водозбірний лоток –  $i_{can}$ . Об'ємна витрата дощового стоку у довільному поперечному перерізі лотка з координатою  $x$  за умови постійної інтенсивності дощу  $q_o$  та незмінного в часі та по площі коефіцієнта басейна стоку  $\psi_{mid}$ :

$$Q(x) = \psi_{mid} q_o L_{con} x. \quad (6)$$

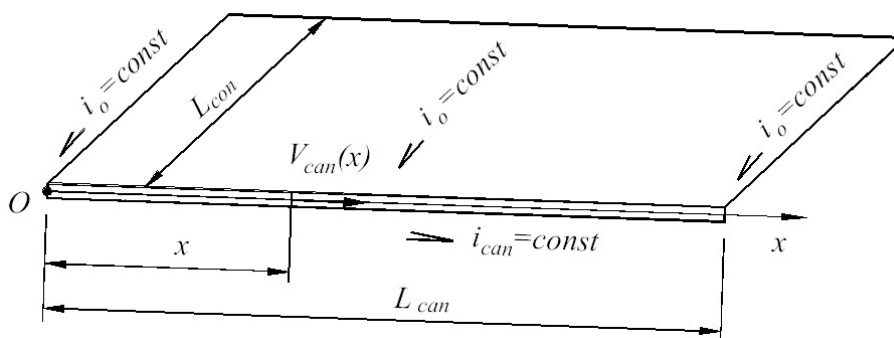


Рис. 1. Схема збору дощового стоку з прямокутного в плані басейна стоку з постійними поперечним і поздовжнім похилами та водозбірним лотком

З іншого боку, застосовуючи до перерізу з координатою  $x$  рівняння Маннінга для рівномірного безнапірного руху рідини, отримуємо:

$$Q(x) = \frac{1}{n_{can}} R_{can}^{2/3} \sqrt{i_{can}} \omega(x), \quad (7)$$

де  $R_{can}$ ,  $\omega(x)$  – відповідно гідравлічний радіус та площа живого перерізу для потоку рідини в лотку в перерізі з поздовжньою координатою  $x$ .

Для лотків з прямокутним поперечним перерізом:

$$\omega(x) = bh(x), \quad (8)$$

$$R_{can}(x) = \frac{bh}{b+2h}, \quad (9)$$

де  $b$  – ширина лотка;  $h(x)$  – глибина потоку в лотку.

Підставляючи (8) і (9) в рівняння (7), та прирівнюючи між собою об'ємну витрату за рівняннями (6) і (7), отримуємо:

$$\psi_{mid} q_o L_{con} x = \frac{(bh)^{5/3} \sqrt{i_{can}}}{n_{can} (b+2h)^{2/3}}. \quad (10)$$

Таким чином, глибина потоку  $h$  може бути неявно виражена як функція  $x$ . За формулою Маннінга середня швидкість течії в поперечному перерізі лотка з координатою  $x$ :

$$V_{can}(x) = \frac{\sqrt{i_{can}}}{n_{can}} \left( \frac{bh}{b+2h} \right)^{2/3}. \quad (11)$$

Час течії поверхневого стоку в лотку

$$t_{can} = \int_0^{L_{can}} \frac{dx}{V_{can}(x)}. \quad (12)$$

Час концентрації дощових стічних вод з прямокутного в плані басейна стоку з водозбірним лотком:

$$t_r = t_{con} + t_{can}, \quad (13)$$

де час поверхневої концентрації  $t_{con}$  знаходиться за формулою (2).

Приймаючи за методом граничних інтенсивностей  $t_d = t_r = (t_{con} + t_{can})$ , можна отримати розрахункову інтенсивність випадання дощу, яка відповідає отриманому часу концентрації. З іншого боку, оскільки час поверхневої

концентрації  $t_{con}$  та час течії стічних вод у водозбірному лотку  $t_{can}$  залежать від інтенсивності дощу  $q_0$ , то остаточне знаходження цих параметрів можливе шляхом поступового наближення з використанням чисельних методів розрахунку.

Розрахункова максимальна секундна витрата дощових стічних вод:

$$Q_r = \psi_{mid} q_0 L_{con} L_{can} = \psi_{mid} q_0 F. \quad (14)$$

### Результати чисельного моделювання

Час течії поверхневого стоку в лотку знаходився чисельним інтегруванням рівняння (12) із покроковим знаходженням глибини потоку в різних поперечних перерізах лотка з рівняння (10) за методом підбору параметра. Лоток довжиною  $L_{can}$  розбивався по довжині на 50 ділянок однакової довжини, визначення часу течії  $t_{can}$  здійснювалося методом середніх прямокутників.

Для автоматизації чисельного розрахунку розроблено комп'ютерну програму для знаходження часу концентрації та розрахункової витрати дощового стоку залежно від значень вхідних параметрів. У роботі виконано серію чисельних експериментів зі знаходження часу концентрації та максимальної витрати дощового стоку для басейнів прямокутної форми в плані та лотків прямокутного поперечного перерізу при зміні значень вхідних параметрів у такому діапазоні:  $\psi_{mid}=0,95$ ;  $q_0=10^{-5}-3 \cdot 10^{-5}$  м/с;  $L_{con}=10-50$  м;  $L_{can}=10-100$  м;  $b=100-300$  мм;  $i_{can}=0,01-0,05$ ;  $n_{can}=0,009-0,013$ . Чисельні експерименти виконані для кліматичних умов рівнинних областей України при періоді одноразового перевищення  $P=1$  рік:  $q_{20} = 100$  л/(с·га) =  $10^{-5}$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);  $n=0,71$ ;  $A=839$ .

На рис. 2 представлено залежності часу концентрації та максимальної витрати дощового стоку залежно від довжини  $L_{can}$  для басейнів стоку різної ширини з водонепроникною поверхнею ( $\psi_{mid}=0,95$ ) та водозбірними лотками з полімербетону ( $n_{can}=0,011$ ).

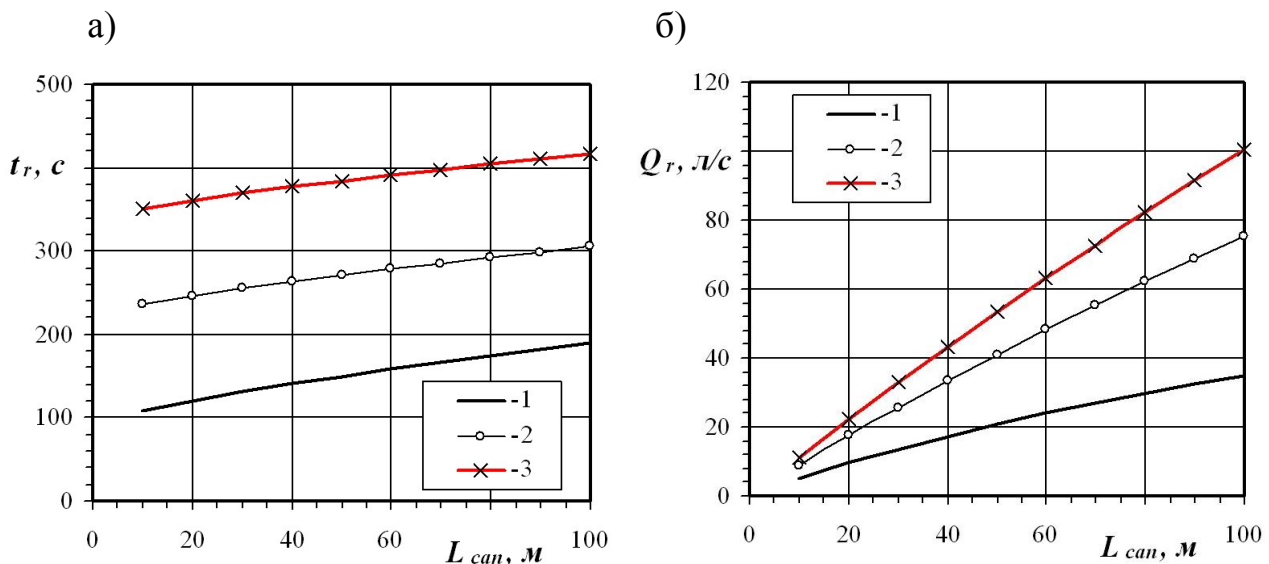


Рис. 2. Залежності часу концентрації (а) та максимальної витрати дощового стоку (б) від протяжності  $L_{can}$  прямокутного в плані басейна стоку: 1 –  $L_{con}=10$  м; 2 –  $L_{con}=30$  м; 3 –  $L_{con}=50$  м ( $\psi_{mid}=0,95$ ;  $i_o=0,02$ ;  $n_1=0,016$ ;  $b=200$  мм;  $i_{can}=0,02$ ;  $n_{can}=0,011$ )

З рис. 2, а видно, наскільки наближеним є положення щодо  $tr=(t_{con}+t_{can})=5-10$  хв., що допускається приймати згідно [1].

Залежності максимальної витрати від протяжності басейна стоку є лінійними лише наближено. Зі збільшенням  $L_{can}$  зростає час концентрації  $tr$  та зменшується розрахункова інтенсивність дощу та максимальна витрата стічних вод. Цей ефект ілюструють залежності питомої витрати дощового стоку  $q_r=Q_r/F$  від протяжності басейна стоку (рис. 3, а).

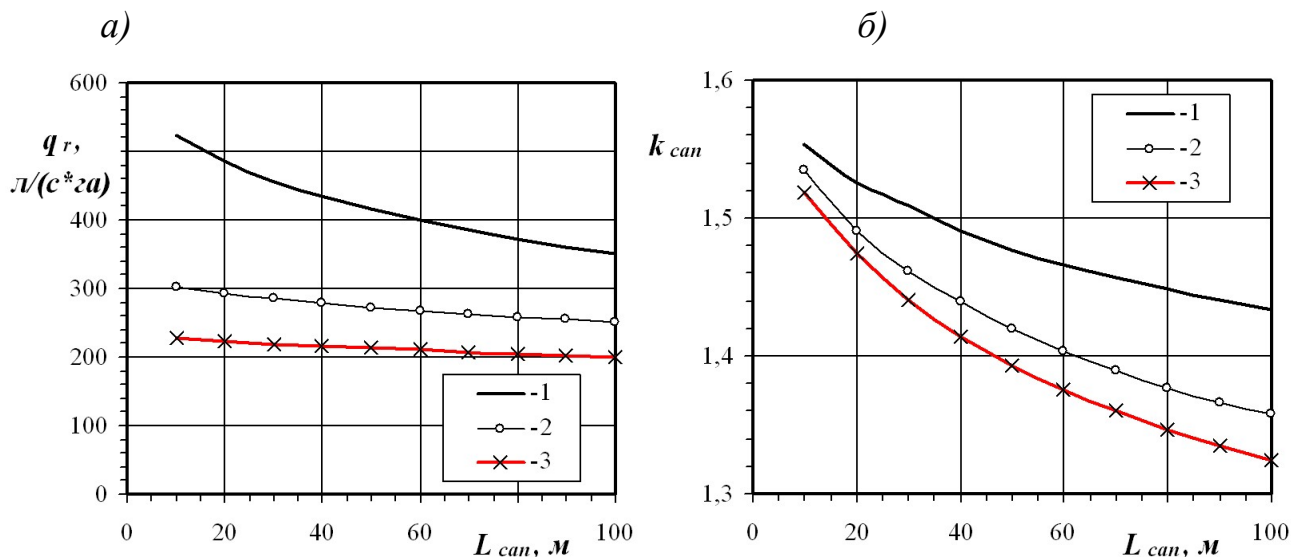


Рис. 3. Залежності питомої витрати дощового стоку  $q_r$  (а) та коефіцієнта нерівномірності течії у водозбірному лотку  $k_{can}$  (б) від протяжності  $L_{can}$  прямокутного в плані басейна стоку: 1 –  $L_{con}=10$  м; 2 –  $L_{con}=30$  м; 3 –  $L_{con}=50$  м ( $\psi_{mid}=0,95$ ;  $i_o=0,02$ ;  $n_1=0,016$ ;  $b=200$  мм;  $i_{can}=0,02$ ;  $n_{can}=0,011$ )

Чисельне моделювання показало, що у більшості практично важливих випадків коефіцієнт нерівномірності течії у водозбірному лотку  $k_{can}$ , який є відношенням максимальної швидкості течії в кінці лотка до середньої швидкості течії в ньому, значно більший за нормативне значення 1,25, прийняте в [1] (рис. 3, б).

На рис. 4 показано вплив коефіцієнта шорсткості та поздовжнього похилу водозбірного лотка на значення максимальної витрати дощового стоку з типового басейна стоку розмірами в плані  $50 \times 50$  м. Виконано порівняння лотків з пластику ( $n_{can}=0,009$ ), полімер-бетону ( $n_{can}=0,011$ ) і бетону ( $n_{can}=0,013$ ).

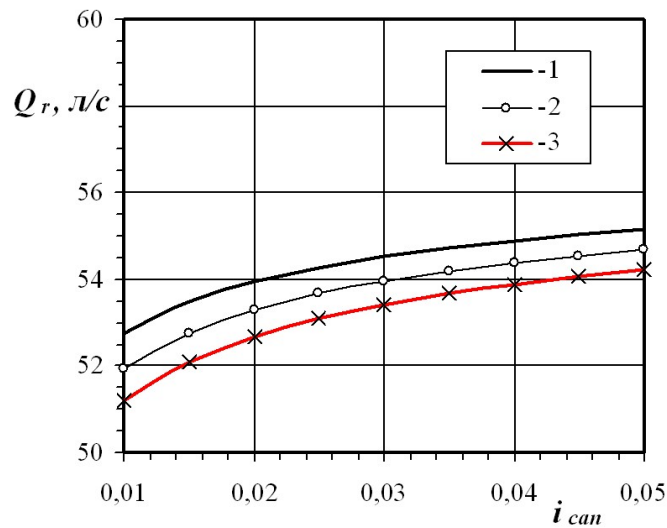


Рис. 4. Залежності максимальної витрати дощового стоку від похилу  $i_{c_{sn}}$  та коефіцієнта шорсткості водозбірного лотка прямокутного перерізу:

1 –  $n_{c_{sn}}=0,009$ ; 2 –  $n_{c_{sn}}=0,011$ ;

3 –  $n_{c_{sn}}=0,013$ ; ( $\psi_{mid}=0,95$ ;  $i_o=0,02$ ;  $n_1=0,016$ ;  $b=200$  мм;  $L_{con}=L_{can}=50$  м)

Видно, що похил та матеріал водозбірних лотків значно менше впливають на максимальну витрату дощового стоку, ніж протяжність та площа басейна стоку, але цей вплив зростає зі збільшенням довжини лотків  $L_{can}$  та зі зменшенням ширини басейна  $L_{con}$ .

### Висновки.

Удосконалено метод гідравлічного розрахунку максимальної витрати та часу концентрації дощових стічних вод з типових прямокутних у плані басейнів стоку зі збірним лотком прямокутного поперечного перерізу, розташованим вздовж нижньої сторони басейна. Враховано взаємозв'язок між часом концентрації стічних вод та розрахунковою інтенсивністю дощу. Розроблено комп'ютерну програму для обчислення розрахункової витрати дощового стоку залежно від значень вхідних параметрів: довжини та ширини басейна стоку, коефіцієнта стоку, кліматичних коефіцієнтів  $n$  і  $A$ , похилу та коефіцієнта шорсткості поверхні басейна стоку, ширини, похилу та коефіцієнта шорсткості водозбірного лотка. Показано, що час концентрації поверхневого стоку у ряді випадків суттєво менший за рекомендований нормативним документом [1] наближений діапазон 5–10 хв. Досліджено вплив на максимальну витрату довжини та ширини басейна стоку, а також поздовжнього похилу та коефіцієнта шорсткості водозбірного лотка. Отримано, що коефіцієнт нерівномірності течії в водозбірному лотку значно перевищує прийняте в [1] постійне значення  $k_{can}=1,25$ .

## *Перелік посилань*

1. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. — 72 с.
2. СНиП 2.05.08-85. Аэродромы / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. — 59 с.
3. Urban Hydrology for Small Watersheds. TR-55. — United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, 1986. — 164 p.
4. Storm Water Management Model. User's Manual. Version 5.0 / L.A. Rossman // EPA/600/R-05/040. — 2007. — 265 p.
5. Жук В.М. Час поверхневої концентрації стоку для дощів постійної інтенсивності та лінійних басейнів стоку // Вісник Нац. у-ту "Львівська політехніка". "Теплоенергетика. Інженерія докiлля. Автоматизація".— Львів: НУ "Львівська політехніка". — 2005.— № 537.— С. 73-81.
6. Mays L.W. Stormwater collection systems design handbook / L.W. Mays. — McGraw-Hill Professional, 2001. — 1008 p.
7. Жук В.М. Теоретичні гідрографи притоку для дощів постійної в часі інтенсивності при змінній швидкості течії / В.М. Жук // Проблеми водопостачання, водовідведення та гiдравліки: Науково-технічний збірник. Випуск 15. — К.: КНУБА, 2010.— С. 119–130.
8. Жук В.М. Розрахункова витрата дощових стічних вод для лінійних в плані басейнів стоку з постійним поздовжнім нахилом / В.М. Жук, І.І. Матлай // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". "Теорія і практика будівництва". — № 697. — Львів. — 2011.— С. 97–103.