

ШТУЧНІ ТА ПІДЗЕМНІ ТРАНСПОРТНІ СПОРУДИ

УДК 628.128

Жук В.М., канд. техн. наук, Матлай І.І.

МАКСИМАЛЬНА ВИТРАТА ДОЩОВИХ СТІЧНИХ ВОД З ПРЯМОКУТНИХ У ПЛАНІ УРБАНІЗОВАНИХ БАСЕЙНІВ СТОКУ З ВОДОЗБІРНИМ ЛОТКОМ

Анотація. У роботі представлено удосконалений метод розрахунку максимальної витрати дощового стоку з прямокутних у плані урбанізованих басейнів стоку з перехоплювальним водовідвідним лотком, розташованим у нижній частині басейна. Розроблено комп'ютерну програму для реалізації запропонованого методу. Отримано графічні залежності максимальної витрати від довжини водозбірного лотка залежно від кліматичних умов, від характеристик басейна стоку та параметрів водозбірних лотків для найтипівіших урбанізованих басейнів стоку з водонепроникним покриттям. Досліджено також коефіцієнт, який враховує зміну швидкості потоку по довжині водозбірних лотків. Отримано значення коефіцієнта нерівномірності в межах 1,55–2,15, що значно перевищує значення 1,25, рекомендоване нормативним документом СНиП 2.04.03–85.

Ключові слова: дощовий стік, урбанізований басейн стоку, розрахункова витрата, час концентрації стоку, водозбірний лоток.

Аннотация. В работе представлен усовершенствованный метод расчета максимального расхода дождевого стока из прямоугольных в плане урбанизированных бассейнов стока с перехватывающим водоотводящим лотком, расположенным в нижней части бассейна. Разработана компьютерная программа для реализации предлагаемого метода. Получены графические зависимости максимального расхода от длины водосборного лотка в

зависимости от климатических условий, от характеристик бассейна стока и параметров водосборных лотков для типичных урбанизированных бассейнов стока с водонепроницаемым покрытием. Исследован также коэффициент, учитывающий изменение скорости потока по длине водосборных лотков. Получено значение коэффициента неравномерности в пределах 1,55–2,15, что значительно превышает значение 1,25, рекомендованное нормативным документом СНиП 2.04.03–85.

Ключевые слова: дождевой сток, урбанизированный бассейн стока, расчетный расход, время концентрации стока, водосборный лоток.

Annotation. Paper presents an improved method of calculating the maximum runoff discharge from a rectangular urbanized catchment with intercepting drainage channel, located at the lower side of the catchment. A computer program for the implementation of the proposed method is proposed. There are obtained the dependencies of the maximum stormwater discharge versus the length of the drainage channel, depending on climatic conditions, the catchment's and drainage channel's parameters for typical urbanized impervious catchments. The coefficient, taking into account the variation of the flow velocity along the drainage channel, was investigated. Flow irregularity coefficient is equal to 1.55–2.15, that is significantly more than 1.25, as recommended by regulatory document SNiP 2.04.03–85.

Key words: stormwater runoff, urbanized catchment, maximum discharge, time of runoff concentration, drainage tray.

Постановка проблеми

Визначення розрахункової витрати дощового стоку є важливим етапом проектування мереж та споруд систем дощового водовідведення. Достовірне визначення розрахункової витрати забезпечує надійність та ефективність функціонування системи дощового водовідведення, що запобігає підтопленню території житлових кварталів, промислових підприємств, проїжджих частин автодоріг та шосе, автостоянок, злітно-посадкових смуг та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В Україні розрахунок параметрів дощового стоку з урбанізованих територій здійснюється відповідно до вимог і рекомендацій [1–3]. Згідно [1] розрахункова витрата дощових стічних вод визначається за формулою:

$$Q_r = \frac{z_{\text{mid}} A^{1,2} F}{t_r^{1,2n-0,1}}, \quad \text{л/с}, \quad (1)$$

де z_{mid} – середнє значення коефіцієнта, який характеризує поверхню басейна стоку; A і n – параметри, які залежать від кліматичних особливостей регіону та від періоду одноразового перевищення розрахункової інтенсивності дощу P ; t_r – розрахункова тривалість дощу, рівна часові концентрації поверхневого стоку для даного перерізу; визначається як сума часу поверхневої концентрації t_{con} , часу протікання води у відкритих лотках t_{can} та часу протікання у закритій водовідвідній мережі t_p , хв; F – загальна площа басейна стоку, га.

За рекомендацією [2] розрахункова витрата дощового стоку з територій аеродромів та вертодромів знаходиться за формулою:

$$Q_r = \frac{\Psi_{\text{mid}} q_{20} 20^n (1 + C \lg P) F}{t_r^n}, \quad \text{л/с}, \quad (2)$$

де Ψ_{mid} – середній коефіцієнт стоку; q_{20} – інтенсивність дощу, л/(с·га), для даної місцевості тривалістю 20 хв. при $P=1$ рік; C – кліматичний коефіцієнт.

Згідно [3] час поверхневої концентрації t_{con} можна обчислити за формулою Абрамова-Шигоріна:

$$t_{\text{con}} = \left(\frac{1,5 n_1^{0,6} L_{\text{con}}^{0,6} 166,7^{0,5}}{z_{\text{mid}}^{0,3} i_o^{0,3} A^{0,5}} \right)^{\frac{1}{(1-0,5n)}}. \quad (3)$$

де n_1 , i_o – відповідно коефіцієнт шорсткості і поздовжній похил басейна стоку; L_{con} – загальна довжина поверхневої концентрації стоку, м.

Час течії дощового стоку по відкритих лотках і каналах згідно [1]:

$$t_{\text{can}} = 1,25 \sum \frac{L_{\text{can}}}{60 \cdot V_{\text{can}}}, \quad (4)$$

де L_{can} – загальна довжина лотка (чи каналу), м; V_{can} – розрахункова швидкість течії в кінці лотка, м/с; 1,25 – коефіцієнт, який враховує наростання швидкості течії по довжині лотка.

Разом з тим, у діючих методах визначення розрахункової витрати дощових стічних вод не враховується ряд параметрів, які впливають на формування стоку з урбанізованих територій, а саме: конфігурація басейна стоку в плані, зворотній взаємозв'язок між інтенсивністю дощу та часом концентрації стоку. Достатньо довільним є припущення щодо значення коефіцієнта нерівномірності течії в лотках $k_{can}=1,25$ у формулі (4). З іншого боку, швидкість у кінці лотка V_{can} залежить від розрахункової витрати та від часу концентрації, який, у свою чергу, є функцією змінної швидкості течії як поверхневого потоку, так і потоку в лотках.

Удосконалена методика розрахунку максимальної витрати дощових стічних вод. У роботах [4–6] авторами було запропоновано удосконалений метод розрахунку гідрографів притоку дощових стічних вод з лінійних та радіальних у плані урбанізованих басейнів стоку. Цей метод дозволяє розраховувати основні параметри гідрографів притоку дощових стічних вод залежно від кліматичних особливостей регіону з урахуванням характеристик басейна стоку (довжини, висотної схеми, конфігурації в плані, похилу, шорсткості поверхні та ін.). У результаті отримані теоретичні формули для розрахунку часу поверхневої концентрації та розрахункової витрати дощового стоку з урахуванням змінної швидкості течії та взаємовпливу між часом концентрації та розрахунковою інтенсивністю дощу. Час поверхневої концентрації з лінійних і радіальних у плані басейнів стоку з постійним поздовжнім похилом:

$$t_{con,lin} = \left[\frac{1,67 \cdot (L_{con} \cdot n_1)^{0,6}}{(1200^n \psi_{mid} q_{20})^{0,4} i_o^{0,3}} \right]^{\frac{1}{1-0,4n}}, \text{ с}; \quad (5)$$

$$t_{con,рад} = \left[\frac{1,41 \cdot (R_{con} \cdot n_1)^{0,6}}{(1200^n \psi_{mid} q_{20})^{0,4} i_o^{0,3}} \right]^{\frac{1}{1-0,4n}}, \text{ с}. \quad (6)$$

де L_{con} , R_{con} – довжина шляху концентрації для лінійного та радіального басейнів стоку відповідно, м; q_{20} – інтенсивність дощу тривалістю 20 хв. при $P=1$ рік, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Розрахункова витрата дощового стоку:

$$Q_{r,lin} = (\psi_{mid} q_{20})^{\frac{1}{1-0,4n}} \left(\frac{720 i_o^{0,3}}{n_1^{0,6} L_{con}^{0,6}} \right)^{\frac{n}{1-0,4n}} \cdot F, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (7)$$

$$Q_{r, \text{рад}} = (\Psi_{\text{mid}} q_{20})^{\frac{1}{1-0,4n}} \left(\frac{851 \cdot i_o^{0,3}}{n_1^{0,6} R_{\text{con}}^{0,6}} \right)^{\frac{n}{1-0,4n}} \cdot F, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (8)$$

де F – площа басейна стоку, м^2 .

Представлені вище залежності справедливі, якщо по всій довжині басейна стоку має місце квадратична область опору турбулентного режиму руху, а зв'язок між витратою поверхневого потоку та його гідравлічним радіусом виражається формулою Маннінга.

Проте їх застосування обмежується ідеальними лінійними та радіальними басейнами стоку, розрахунок яких ведеться спрощено, нехтуючи наявністю дощової водовідвідної мережі певної конфігурації в плані. При цьому при розрахунку максимальної витрати дощового стоку не беруться до уваги такі параметри, як t_{can} та t_p , а час концентрації дощового стоку t_r ототожнюється з часом поверхневої концентрації t_{con} . Однак, розрахунок поверхневого стоку з територій міської забудови вимагає врахування реальної конфігурації водовідвідної мережі.

Метою роботи є розробка удосконаленого методу розрахунку максимальної витрати дощового стоку з прямокутних у плані басейнів стоку з перехоплювальним водозбірним лотком, розташованим у нижній частині басейна.

Метод розрахунку максимальної витрати дощових стічних вод з урахуванням конфігурації водовідвідної мережі. Для дослідження впливу конфігурації водовідвідної мережі на основні параметри гідрографів притоку розглянуто дощовий стік з прямокутних у плані басейнів стоку з перехоплювальним водозбірним лотком у нижній частині басейна (рис. 1, а). Басейн приймався однорідним, з постійним у всіх точках поперечним похилом i_o та однаковим у всіх точках і незмінним в часі середнім коефіцієнтом стоку Ψ_{mid} .

Розглянуто сучасні типові водозбірні лотки з поперечним перерізом, представленим на рис. 1,б. Для покращення гідравлічних характеристик при малих витратах нижня частина лотків виконана з заокругленням радіусом r .

Визначимо геометричні характеристики живого перерізу потоку в лотку. При наповненні лотка $h < r$ кут α :

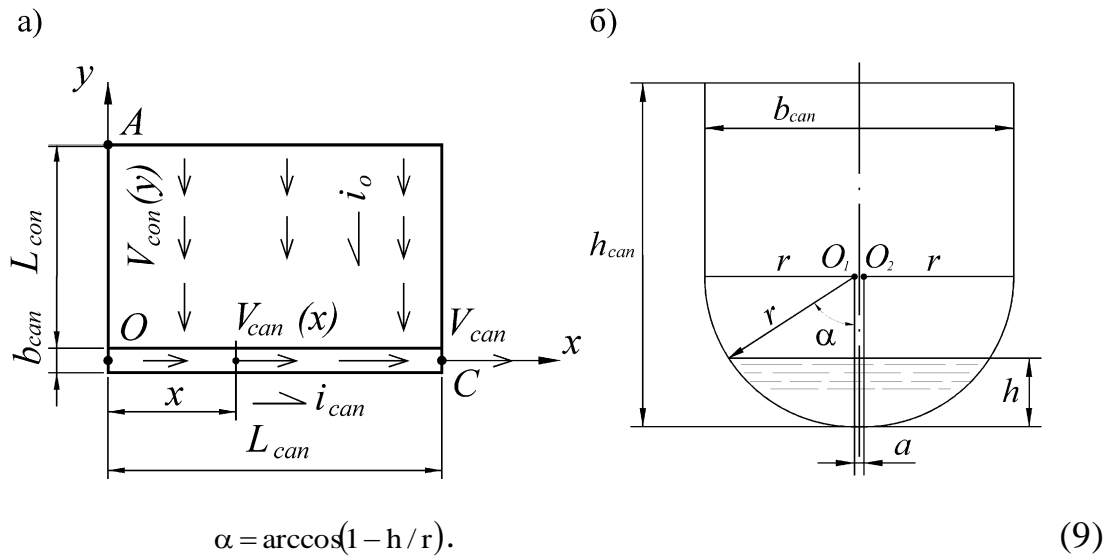


Рисунок 1 – Схеми прямокутного в плані басейна стоку з :

а) схема поверхневого стоку; б) поперечний переріз водозбірної лотка

Площа живого перерізу потоку ω_{can} , змочений периметр χ_{can} та гідравлічний радіус R_{can} при $h < r$ відповідно визначаються за формулами:

$$\omega_{can} = \alpha r^2 - (r - h)\sqrt{r^2 - (r - h)^2} + ah, \quad (10)$$

$$\chi_{can} = 2\alpha r + a, \quad (11)$$

$$R_{can} = \frac{r^2 \arccos(1 - h/r) - (r - h)\sqrt{2rh - h^2} + ah}{2r \arccos(1 - h/r) + a}. \quad (12)$$

При $h \geq r$ площа живого перерізу потоку, змочений периметр та гідравлічний радіус відповідно дорівнюють:

$$\omega_{can} = \pi r^2 / 2 + ar + b_{can}(h - r), \quad (13)$$

$$\chi_{can} = \pi r + a + 2(h - r), \quad (14)$$

$$R_{can} = \frac{\pi r^2 / 2 + ar + b_{can}(h - r)}{\pi r + a + 2(h - r)}. \quad (15)$$

Витрата дощового стоку у довільному перерізі лотка з координатою x (рис. 1, а):

$$Q(x) = \psi_{\text{mid}} q_0 L_{\text{con}} x, \quad (16)$$

де q_0 – розрахункова інтенсивність випадання дощу, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, яка відповідає тривалості дощу, чисельно рівній часу концентрації дощового стоку зі всього басейна стоку.

З іншого боку, за формулою Маннінга розрахункова витрата потоку у лотку:

$$Q(x) = R_{\text{can}}^{2/3} \omega_{\text{can}} \sqrt{i_{\text{can}}} / n_{\text{can}}, \quad (17)$$

де i_{can} – поздовжній похил лотка; n_{can} – коефіцієнт шорсткості стінок лотка.

Прирівнявши вирази (16) і (17), можна визначити наповнення лотка $h(x)$, а відтак і швидкість потоку $V_{\text{can}}(x)$ у довільному перерізі з координатою x .

Час протікання стічних вод по водозбірному лотку:

$$t_{\text{can}} = \int_0^{L_{\text{can}}} \frac{dx}{V_{\text{can}}(x)}, \text{ с.} \quad (18)$$

Час концентрації дощового стоку з досліджуваного басейна стоку:

$$t_r = t_{\text{con}} + t_{\text{can}}, \quad \text{с.} \quad (19)$$

де час поверхневої концентрації t_{con} визначали за теоретичною формулою (5) для лінійних у плані басейнів стоку.

Уточнене значення інтенсивності дощу, яке відповідає тривалості дощу, рівній t_r :

$$q_0 = q_{20} (1200/t_r)^n, \quad \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (20)$$

Розрахунки виконувалися за розробленою авторами програмою. Водозбірний лоток розбивався по довжині на 50 відрізків однакової довжини. Для середини кожного відрізка вирішувалася система рівнянь (16) і (17), після чого виконувалося чисельне інтегрування виразу (18). У першому наближенні приймали $q_0 = q_{20}$. Цикл обчислень за формулами (16)–(20) продовжувався доти,

доки відносна різниця між попереднім і наступним значеннями розрахункової інтенсивності дощу не була меншою за 0,01 %.

Результати чисельного розрахунку максимальної витрати дощових стічних вод з прямокутних у плані басейнів стоку з водозбірним лотком. Згідно [7] при наявності закритої внутрішньоквартальної дощової мережі і ширині вулиці до 30 м дощоприймачі потрібно встановлювати на відстанях 50, 60, 70 або 80 м один від одного при поздовжньому похилі вулиці відповідно 0,004; 0,004–0,006; 0,006–0,01; 0,01–0,03.

На рис. 2 представлено результати теоретичного дослідження максимальної витрати дощового стоку з прямокутних у плані басейнів стоку з різними значеннями ширини L_{con} . Розглянуто басейни стоку з удосконаленими водонепроникними покриттями, для яких $\psi_{mid}=0,95$. Максимальна довжина водовідвідних лотків згідно [6] прийнята рівною $L_{can}=50-80$ м. У розрахунках приймалися бетонні водовідвідні лотки типів МАХІ 11.19.23, 16.25.31, МАХІ 20.29.33 виробництва компанії "Стандартпарк" шириною відповідно 110, 160 і 200 мм з заокругленим дном та коефіцієнтом шорсткості $n_1=0,013$. Поздовжній похил лотків приймався рівним $i_{can}=0,004$ для лотків довжиною до 50 м та $i_{can}=0,02$ при $L_{can}=80$ м.

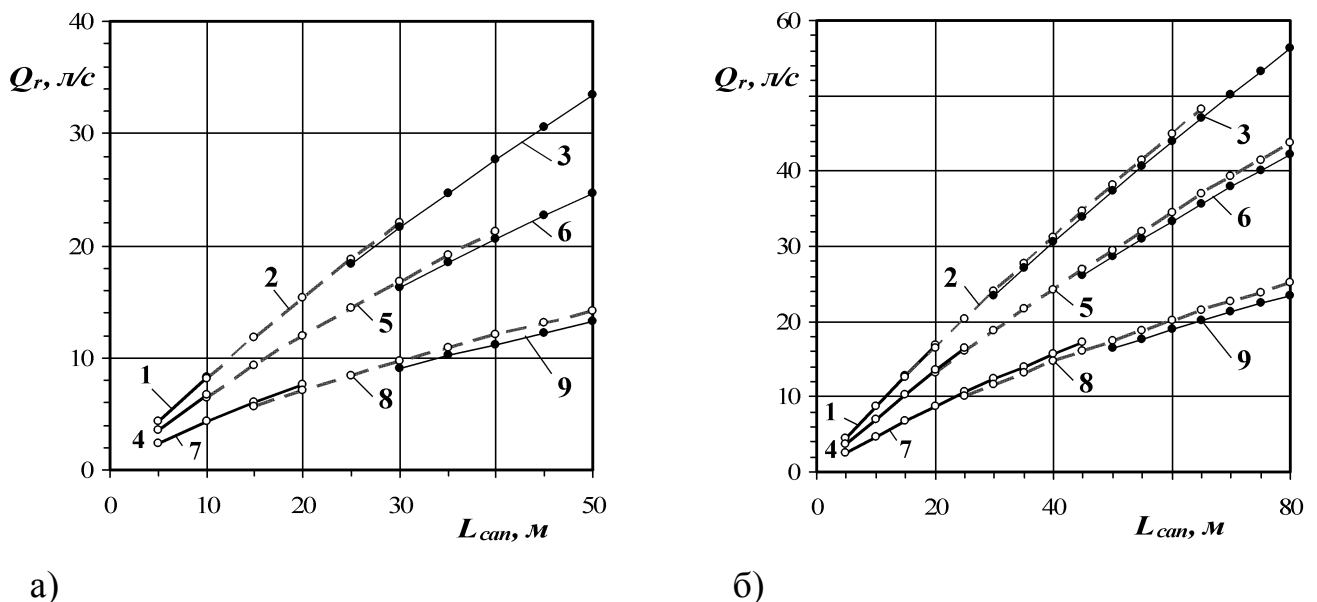


Рисунок 2 – Залежність максимальної розрахункової витрати дощового стоку Q_r від протяжності басейна стоку L_{can} для $i_{can}=0,004$ (а), $i_{can}=0,02$ (б): 1, 2, 3 – при $L_{con}=30$ м; 4,5,6 – при $L_{con}=20$ м; 7,8,9 – при $L_{con}=10$ м; 1, 4, 7 – лотки МАХІ 11.19.23; 2, 5, 8 – лотки 16.25.31; 3, 6, 9 – МАХІ 20.29.33 ($\psi_{mid}=0,95$; $q_{20}=100$ л/(с·га); $i_o=0,02$; $n_1=0,013$)

Отримано діапазони допустимого використання бетонних лотків різної ширини для вказаних умов. Графіки на рис. 2 дають уявлення про максимальну довжину лотків малої ширини (110 і 160 мм) при різних значеннях ширини басейна L_{con} та різних значеннях поздовжнього похилу i_{can} . Слід також зауважити, що графіки залежності Q_r від L_{can} , представлені на рис. 2, побудовані для лотків постійної від самого початку довжини. Збільшення ширини лотків по довжині басейна призводить до незначного (до 10%) зростання розрахункової витрати порівняно з представленими результатами.

Досліджено також залежність від різних факторів коефіцієнта нерівномірності течії в лотках k_{can} , який враховує зміну швидкості потоку по довжині водозбірного лотка L_{can} . Коефіцієнт нерівномірності течії в лотку обчислювали за формулою

$$k_{can} = \frac{t_{can}}{L_{can} \cdot V_{can}}, \quad (21)$$

де $V_{can}=V_{can}(L_{can})$ – швидкість течії у кінцевому перерізі водозбірного лотка, м/с.

На рис. 3 представлено залежності k_{can} від L_{can} при різних значеннях ширини басейна L_{con} .

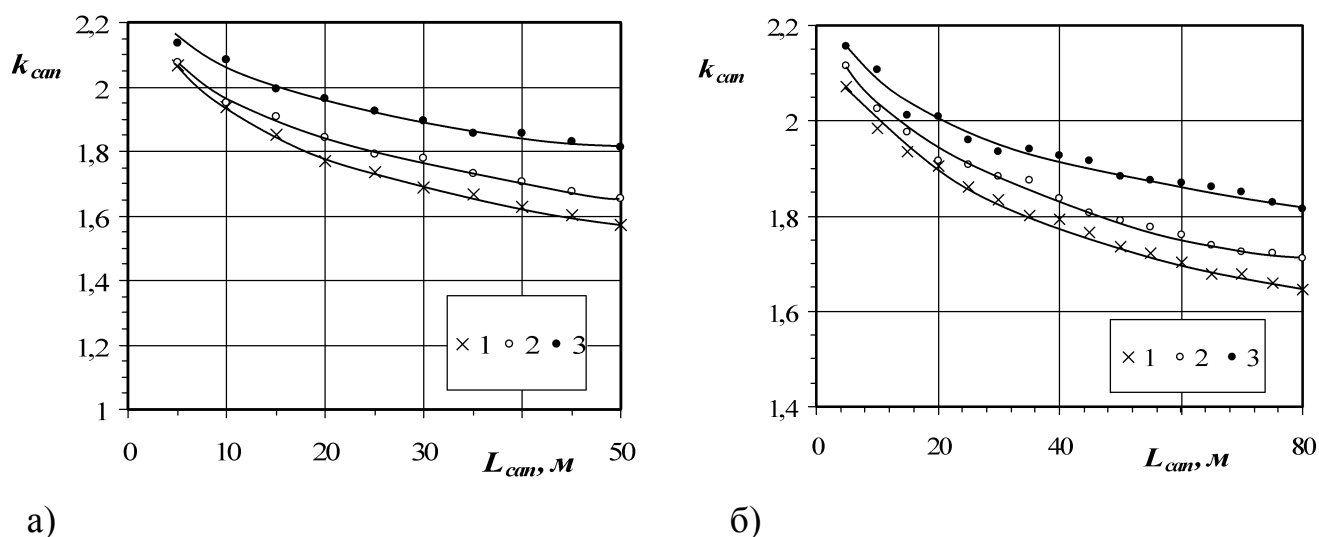


Рисунок 3 – Зміна коефіцієнта k_{can} залежно від довжини водозбірного лотка L_{can} для $i_{can}=0,004$ (а), $i_{can}=0,02$ (б) при: 1 – $L_{con}=30$ м; 2 – $L_{con}=20$ м; 3 – $L_{con}=10$ м ($\psi_{mid}=0,95$; $q_{20}=100$ л/(с·га); $i_o=0,02$; $n_1=0,013$; лотки – МАХІ 20.29.33; $b_{can}=200$ мм)

Отримані для бетонних лотків шириною $b_{\text{can}}=200$ мм значення коефіцієнта нерівномірності k_{can} в межах 1,55–2,15 значно перевищують значення $k_{\text{can}}=1,25$, регламентоване в нормативному документі [1].

Висновки

Розроблено удосконалений метод розрахунку максимальної витрати дощового стоку з прямокутних у плані басейнів стоку з перехоплювальним водозбірним лотком, розташованим у нижній частині басейна та складено комп'ютерну програму для визначення розрахункової витрати та часу концентрації поверхневого стоку залежно від характеристик басейна стоку та водозбірних лотків. Отримано, що коефіцієнт нерівномірності течії у водозбірних лотках значно перевищує нормативне значення 1,25 і становить в межах від 1,55 до 2,15.

Література

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. Калицун В.И. Водоотводящие системы и сооружения: Учеб. пособие. / В.И. Калицун — М.: Стройиздат, 1987. — 336 с.
4. Жук В.М. Теоретичні гідрографи притоку для дощів постійної в часі інтенсивності при змінній швидкості течії / В.М. Жук // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник. Випуск 15. — К.: КНУБА, 2010. — С. 119–130.
5. Жук В.М. Розрахункова витрата дощових стічних вод для лінійних в плані басейнів стоку з постійним поздовжнім похилом / В.М. Жук, І.І. Матлай / Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". "Теорія і практика будівництва". — № 697. — Львів. — 2011. — С. 97–103.
6. Матлай І.І. Розрахункова витрата та час концентрації дощового стоку з радіальних у плані басейнів з постійним поздовжнім похилом / І.І. Матлай, В.М. Жук, М.А. Саницький // Науковий вісник Нац. лісотехнічного ун-ту України. Вип. 22.1 — Львів: НЛТУ — 2012. — С. 119–125.
7. Алексеев М.И. Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий: учеб. пособие / М.И. Алексеев, А.М. Курганов. — М.: Изд-во АСВ; СПб.: СПбГАСУ, 2000. — 352 с.