

РОЗРАХУНКОВА ВИТРАТА ДОЩОВИХ СТИЧНИХ ВОД ДЛЯ ЛІНІЙНИХ У ПЛАНІ БАСЕЙНІВ СТОКУ З ПОСТІЙНИМ ПОЗДОВЖНІМ НАХИЛОМ

© Жук В.М., Матлай І.І., 2011

Наведено огляд сучасних методів обчислення розрахункової витрати дощових стічних вод. Отримано залежність для визначення розрахункової витрати для лінійних у плані басейнів стоку з постійним поздовжнім нахилом для дощів постійної в часі інтенсивності при врахуванні змінної швидкості течії поверхневого потоку та зворотного зв'язку між часом концентрації і розрахунковою інтенсивністю дощу.

Ключові слова: розрахункова витрата, інтенсивність дощу, коефіцієнт стоку.

The review of methods for peak discharge runoff calculation is presented. There are obtained formulas for the peak discharge calculation for linear watershed with the constant longitudinal slope for the constant rainfall intensity, taking into account the variable overland flow velocity and cross-dependence of the time of concentration and rainfall intensity.

Key words: peak discharge, rainfall intensity, runoff coefficient.

Постановка проблеми. Одним із наслідків глобальних кліматичних змін є порушення існуючого гідрологічного балансу цілих регіонів планети. Водночас у світі продовжується активне освоєння нових територій та зміна ландшафтів з природних на урбанізовані. У результаті збільшується об'єм поверхневих стічних вод та їх максимальна витрата, що призводить до перевантаження систем водовідведення та підтоплення території, що негативно впливає на санітарний стан як місцевості, так і прилеглих водойм.

Одним із основних параметрів, які потрібно визначити для адекватного оцінювання впливу дощового стоку на систему дощового водовідведення, є його розрахункова витрата. Достовірний розрахунок цієї величини дає змогу адекватно підібрати діаметри дощових водовідвідних мереж, розміри і параметри споруд на них.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для визначення витрати дощового стоку як з урбанізованих, так і з неурбанізованих територій використовується значна кількість методів, розроблених вітчизняними та закордонними науковцями [1–11]. Переважна більшість з них – це емпіричні методи, які ґрунтуються на даних, отриманих експериментальним дослідженням певних специфічних басейнів стоку. Як правило, такі методи не враховують багатьох фізичних факторів і мають вузькі межі застосування.

Мета роботи – отримати залежність для визначення розрахункової витрати дощового стоку з лінійних у плані басейнів стоку з постійним поздовжнім нахилом для дощів постійної в часі інтенсивності, враховуючи змінну швидкість течії поверхневого потоку та взаємозв'язок між часом концентрації дощового стоку та розрахунковою інтенсивністю випадання дощу; виконати порівняльний аналіз сучасних методів обчислення розрахункової витрати дощового стоку, що використовуються в Україні та за кордоном, а також методики, запропонованої авторами.

1. Сучасні методи визначення розрахункової витрати. Розрахункова витрата дощових стічних вод – це максимальна об’ємна витрата поверхневого стоку, який утворюється в результаті випадання дощу розрахункової інтенсивності та певної повторюваності [2, 3]. У науковій та інженерній практиці сьогодні використовується значна кількість методів для обчислення розрахункової витрати дощового стоку. Вони належать до двох принципово відмінних груп. Перша група методів дає змогу визначити максимальну витрату дощового стоку від одного окремо взятого дощу або зливи певної повторюваності та тривалості (так звані одноподійні моделі). Методи другої групи забезпечують неперервне в часі моделювання протягом місяців і років, для літніх і зимових умов з урахуванням реальних гістограм випадання дощу в певній місцевості. У статті розглянуто лише одноподійні методи.

1.1. Метод граничних інтенсивностей. Основним методом для визначення розрахункової витрати на території України, за рекомендацією нормативного документа [1], є метод граничних інтенсивностей. За цим методом припускається, що залежність інтенсивності випадання дощу від його тривалості t_d описується спадним степеневим законом:

$$q_{\bar{a}} = \frac{A}{t_{\bar{a}}^n} \quad (1)$$

Розрахункова (максимальна секундна) витрата поверхневого стоку за методом граничних інтенсивностей [1]:

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

де z_{mid} – середнє значення коефіцієнта, який характеризує поверхню басейну стоку; F – загальна площа басейну стоку, га; t_r – розрахункова тривалість дощу, що дорівнює часовій концентрації поверхневого стоку для даного перерізу, хв; A і n – параметри, які залежать від кліматичних особливостей регіону При періоді одноразового перевищення P :

$$A = q_{20} \cdot 20^n \cdot \left(1 + \frac{\lg P}{\lg m_p}\right)^g \quad (3)$$

де q_{20} – інтенсивність дощу, л/(с·га), для певної місцевості тривалістю 20 хв при $P=1$ рік.

Згідно з [1]:

$$t_r = t_{con} + t_{can} + t_p \quad (4)$$

де t_{con} – час поверхневої концентрації, згідно з [1] його рекомендується приймати 5–10 хв за відсутності внутрішньоквартальної закритої дощової мережі і 3–5 хв – за її наявності; t_{can} – час протікання води по лотках до дощоприймача, хв.; t_p – час протікання води по трубопроводах, хв.

Для обчислення часу поверхневої концентрації у вітчизняній літературі [2] рекомендується використовувати формулу Абрамова – Шигоріна:

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

де n_1 , L_{con} , i_o – відповідно коефіцієнт шорсткості, загальна довжина і середній нахил басейну стоку.

Недоліками цього методу є те, що при визначенні Q_r не враховується форма басейну стоку в плані та висотна схема басейну. Коефіцієнт стоку, незалежно від характеристик басейну, визначається емпіричною залежністю, отриманою на основі дослідів, виконаних у 1932–1934 рр. під керівництвом Н. Белова:

$$y_{mid} = z_{mid} q_d^{0,2} t_d^{0,1} \quad (6)$$

Особливо велику похибку цей метод дає при визначенні розрахункової витрати на початку закритої водовідвідної мережі, оскільки вибір часу t_{con} у межах, вказаних [1], є доволі умовним і залежить від інтуїції проєктувальника, а формула (5) для обчислення часу t_{con} ніяк не враховує зворотного впливу цього часу на розрахункову інтенсивність дощу.

1.2. *Раціональний метод (Rational Method)*. У закордонній інженерній практиці одним із найпоширеніших використовуваних методів визначення розрахункової витрати дощового стоку є так званий раціональний метод [8, 9]. За цим методом максимальна витрата дощового стоку залежить від інтенсивності дощу, попередніх гідрологічних умов басейну стоку і характеристик водовідвідної системи. Для невеликих і значною мірою водонепроникних басейнів стоку основним чинником, який впливає на витрату стоку, є інтенсивність дощу. Для великих басейнів стоку провідними є їхні вихідні фізичні та геодезичні параметри. На практиці раціональний метод застосовують для басейнів стоку загальною площею до 90 га.

За раціональним методом розрахункова витрата дощового стоку:

$$Q_r = C_f C q_d F, \quad (7)$$

де C_f – коефіцієнт водонасичення ґрунту басейну стоку; C – безрозмірний коефіцієнт стоку раціонального методу, який виражає відношення об'єму стоку до об'єму опадів (тобто $C = \psi_{mid}$); q_d – середня в часі інтенсивність дощу тривалістю, що дорівнює часу концентрації поверхневого стоку t_r .

Коефіцієнти C , наведені в [8–10], використовуються для дощів з інтервалом повторюваності не більше 10 років. Корегують раціональний метод для використання при інтенсивніших дощах за допомогою коефіцієнта насиченості C_f (табл. 1). При цьому добуток коефіцієнтів C і C_f не повинен перевищувати 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта насичення ґрунту C_f

Період повторюваності P , роки	Значення C_f
≤ 10	1,0
25	1,1
50	1,2
100	1,25

Перевагою раціонального методу при обчисленні розрахункової витрати є врахування зворотного взаємозв'язку між інтенсивністю дощу та часом поверхневої концентрації. Задаючись певним значенням інтенсивності випадання дощу, характерного для деякого регіону, за методом кінематичної хвилі знаходять час поверхневої концентрації:

$$t_{con} = \frac{L_{con} n_1^{0,6}}{(y_{mid} q_d)^{0,4} i_o^{0,3}}. \quad (8)$$

Для цього часу концентрації за спеціальними діаграмами для певного регіону знаходять відповідну інтенсивність дощу (рис. 1). Підставляючи її у вираз (8), знаходять нове значення часу концентрації. Отже, поступовим наближенням знаходять дійсне значення інтенсивності дощу і витрату дощового стоку.

1.3. *Графічний метод SCS США*. Графічний метод визначення максимальної витрати дощового стоку розроблено з використанням комп'ютерної програми для проектування гідрологічних процесів TR-20. Це – основний метод визначення максимальної витрати дощового стоку в США за нормативним документом [11], його застосовують як для урбанізованих, так і для неурбанізованих територій. Основними вхідними параметрами для визначення розрахункової витрати у графічному методі є час концентрації t_r , номер порядкової кривої CN , загальна площа басейну стоку F , наявність заболочених і заліснених територій та тип розподілу інтенсивності дощу (рис. 2).

Розрахункова витрата дощового стоку за графічним методом:

$$q = q_u F H_{cm} N_p, \quad (9)$$

де q_u – одинична розрахункова витрата; H_{cm} – висота шару стоку; N_p – коефіцієнт залісненості та заболоченості басейну стоку (табл. 2).

Коефіцієнт залісненості та заболоченості N_p

Площа заболочених і заліснених територій, %	N_p
0	1,00
0,2	0,97
1	0,87
3	0,75
5	0,72

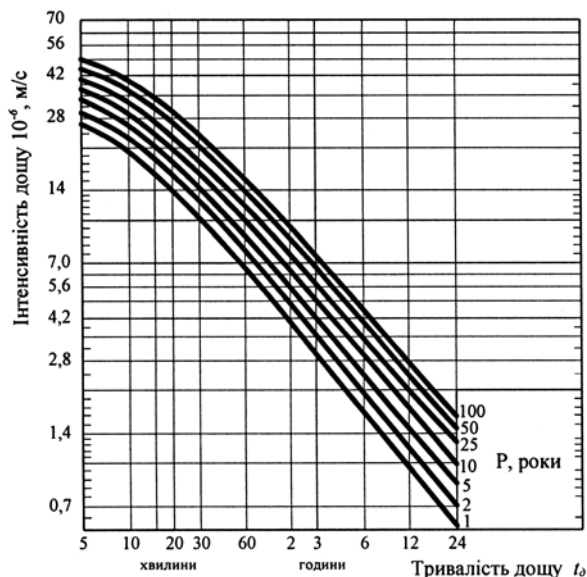


Рис. 1. Типові криві залежності інтенсивності випадання дощу від його тривалості та від періоду повторюваності P (за даними [9])

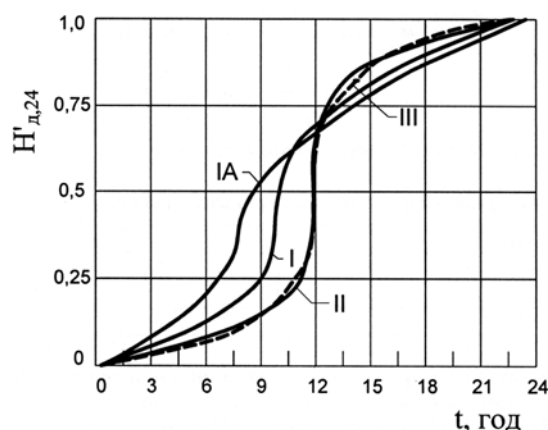


Рис. 2. Типові інтегральні криві випадання дощу в часі [11]

Для дощу з певним заданим періодом повторюваності знаходять висоту шару опадів 24-годинного дощу $H_{0,24}$. За номером порядкової кривої CN , який знаходять за детально розробленими таблицями залежно від виду земельної ділянки за призначенням та від типу ґрунтів, отримують значення висоти шару початкового затримання H_0 . За співвідношенням $H_0/H_{0,24}$ та часом поверхневої концентрації за спеціальними номограмами [11] знаходять одну розрахункову витрату q_u для заданого типу розподілу інтенсивності дощу.

Недоліками цього методу є вимоги до ґрунту і типу покриття басейну стоку. За графічним методом вони мають бути однаковими по всій території басейну стоку і відповідати одному значенню номера порядкової кривої CN , яке не може бути меншим за 40. Достовірність графічного методу залежатиме від величини співвідношення $H_0/H_{0,24}$, яке має бути в діапазоні 0,1–0,5. Час концентрації за графічним методом має бути в межах 0,1 – 10 год.

1.4. Метод Андерсона. У закордонній інженерній практиці доволі часто використовується метод Андерсона (*D. Anderson*) [8]. Цей метод був розроблений геологічною службою США (USGS) у 1968 р. Основною задачею методу на початках було оцінення впливу урбанізації на гідрологічний стан територій у Північній Вірджинії. Розроблявся метод шляхом аналізу басейнів стоку з площею до 150000 га.

Однією з особливостей методу Андерсона є використання у розрахунках так званого часу затримки t_{lag} . Оскільки час затримки змінюється у разі забудови басейну стоку, його визначення важливе для оцінювання можливих максимальних витрат. Оцінивши дані з 33 природних і 20 повністю урбанізованих басейнів стоку, Андерсон дійшов висновку, що час затримки є функцією довжини басейну стоку і його нахилу. Однією з переваг методу Андерсона є можливість легкого обчислення часу затримки.

Для природних, неурбанізованих басейнів стоку:

$$t_{lag} = 0,028 \cdot (L_{con} / \sqrt{i_o})^{0,42}, \quad (10)$$

для удосконалених і частково каналізованих басейнів стоку:

$$t_{lag} = 0,0026 \cdot (L_{con} / \sqrt{i_o})^{0,5}, \quad (11)$$

для повністю урбанізованих і каналізованих басейнів стоку:

$$t_{lag} = 0,0013 \cdot (L_{con} / \sqrt{i_o})^{0,52}. \quad (12)$$

Для частково удосконалених басейнів стоку досі немає єдиного підходу до визначення часу затримки.

Загальна формула для обчислення максимальної витрати за методом Андерсона:

$$Q_r = 0,068 R K F^{0,82} t_{lag}^{-0,48}, \quad (13)$$

де R – коефіцієнт, який залежить від частоти повторюваності повеней; K – коефіцієнт проникності ґрунту басейну стоку ($K=1+0,015p$, де p – відсоток території басейна стоку з водонепроникною поверхнею); t_{lag} – час затримки, год.

1.5. *Метод Снайдера*. Цей метод розробив Ф. Снайдер (*F. Snyder*) у 1958 р., інша його назва – синтетичний метод розрахунку частоти повеней. Застосування методу обмежується площею басейну стоку від 80 до 5200 га. Метод ґрунтується на знаходженні максимальної витрати з використанням часу концентрації, площі басейну стоку і так званої норми стоку:

$$Q_r = 0,775 F I_R, \quad (14)$$

де $I_R = [H_{cm}/t_r]$, м/с; t_r – час концентрації, с; H_{cm} – норма стоку, м.

$$t_r = 3600 C_t \left(\frac{10 L_{con} n_1}{\sqrt{i_o}} \right)^{0,6} \quad (15)$$

C_t – коефіцієнт, який залежить від ступеня забудови басейну стоку (табл. 3):

Таблиця 3

Значення коефіцієнта ступеня забудови басейну стоку

Тип басейну стоку	C_t , год/км
Неурбанізований басейн стоку	2,74
Частково каналізований	1,37
Каналізований	0,68

2. Удосконалення методу визначення розрахункової витрати для лінійного басейну стоку. Згідно з [7] час поверхневої концентрації з лінійних у плані басейнів стоку за умов незмінної в часі інтенсивності дощу і постійного за довжиною нахилу басейна стоку дорівнює (при $z=2/3$, за Маннінгом):

$$t_{con} = \frac{5(L_{con} n_1)^{0,6}}{3(\psi_{mid} q_{\bar{a}})^{0,4} t_o^{0,3}}. \quad (16)$$

За методом граничних інтенсивностей з (1) і (3) впливає, що розрахункова інтенсивність випадання дощу тривалістю $t_{\bar{a}}$ та періодом $P=1$ рік:

$$q_{\bar{a}} = q_{20} \left(\frac{60 \cdot 20}{t_{\bar{a}}} \right)^n. \quad (17)$$

Приймаючи, що розрахункова тривалість дощу дорівнює часові поверхневої концентрації ($t_{\bar{a}}=t_{con}$), отримуємо

$$q_{\bar{a}} = q_{20} \left(\frac{1200 \cdot 3 \psi_{mid}^{0,4} q_{\bar{a}}^{0,4} i_o^{0,3}}{5 n_1^{0,6} L_{con}^{0,6}} \right)^n, \quad (18)$$

З рівняння (18) можна отримати загальний розв'язок:

$$q_{\bar{a}} = q_{20}^{\frac{1}{1-0,4n}} \left(\frac{3600 \psi_{mid}^{0,4} i_o^{0,3}}{5 n_1^{0,6} L_{con}^{0,6}} \right)^{\frac{n}{1-0,4n}}. \quad (19)$$

У загальному випадку розрахункова витрата дощових стічних вод:

$$Q_r = \psi_{mid} q_{\bar{a}} F. \quad (20)$$

Підставивши (19) у (20), отримаємо вираз для обчислення розрахункової витрати дощових стічних вод з лінійних у плані басейнів стоку з постійним за довжиною нахилом:

$$Q_r = (\psi_{mid} q_{20})^{\frac{1}{1-0,4n}} \left(\frac{3600 i_o^{0,3}}{5 n_1^{0,6} L_{con}^{0,6}} \right)^{\frac{n}{1-0,4n}} \cdot F. \quad (21)$$

3. Порівняння результатів визначення розрахункової витрати за різними методами. Для отримання узагальнених результатів було порівняно дані, отримані при обчисленні розрахункової витрати залежно від площі басейну стоку за трьома різними методами: методом СНиП 2.04.03-85 з використанням формули Абрамова – Шигоріна для обчислення часу поверхневої концентрації t_{con} , раціональним методом (*Rational Method*), методом кафедри ГС Національного університету «Львівська політехніка». Модель басейну стоку приймалась лінійною, з постійним поздовжнім нахилом. При обчисленні витрати використовувалися схеми з різним співвідношенням довжини і ширини басейну стоку L/B .

На рис. 3 графічно зображено порівняння результатів числового розрахунку максимальної витрати дощових стічних вод за трьома вищеописаними методами. Для обчислень фізичні параметри басейну стоку приймали однаковими: середній нахил $i_o=0,01$, коефіцієнт стоку $\psi_{mid}=0,95$ [4], коефіцієнт шорсткості поверхні $n_1=0,015$. Інтенсивність випадання дощу у першому наближенні приймали $q_o=10^{-5}$ м/с=100 л/(с·га), але враховувався зворотний взаємозв'язок між інтенсивністю дощу та розрахунковим часом його випадання t_o за законом (1).

На рис. 4 зображено графіки залежності розрахункової витрати дощового стоку, обчисленої за запропонованим авторами методом, від площі басейну стоку F при різних співвідношеннях довжини L/B басейну та різних значеннях середнього нахилу i_o .

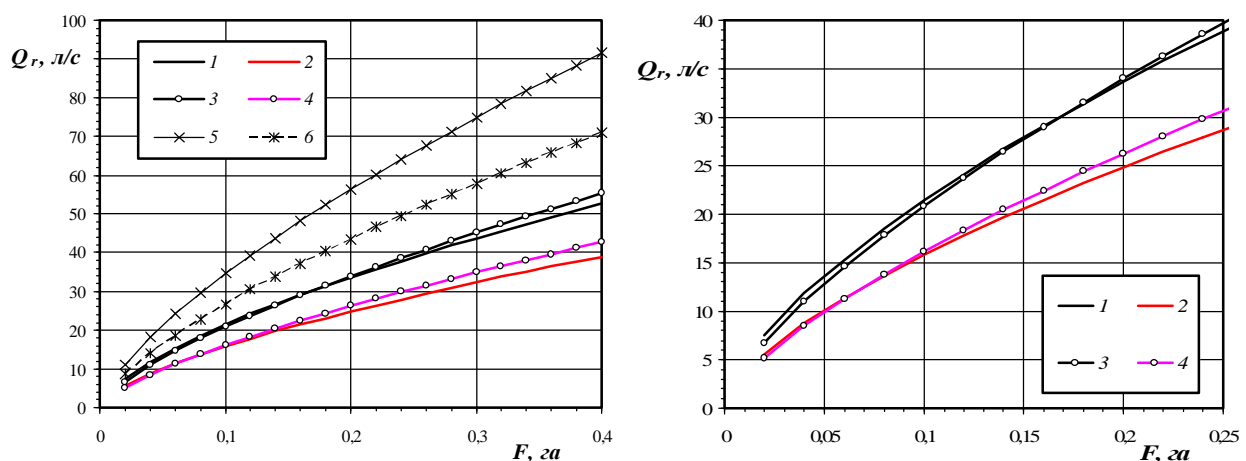
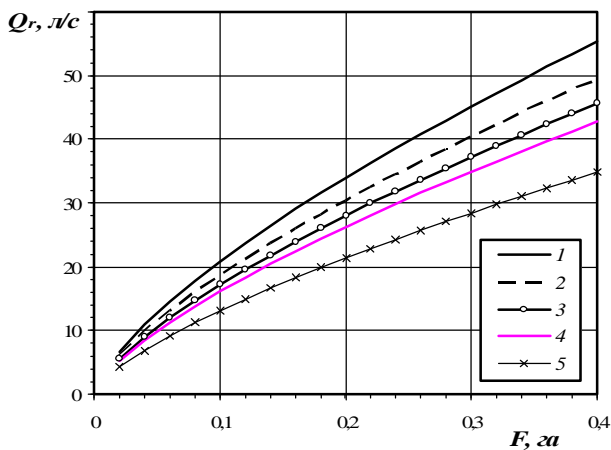
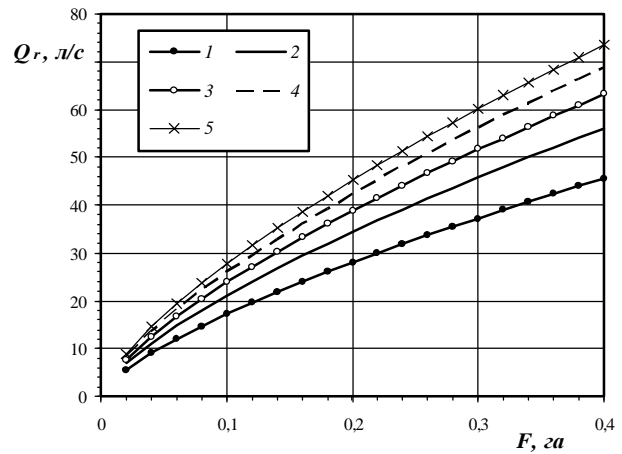


Рис. 3. Залежності максимальної витрати дощового стоку Q_r від площі басейну стоку F при $n=0,71$; $i_o=0,01$; $n_1=0,015$; $q_o=10^{-5}$ м/с: 1, 2 – за методом СНиП 2.04.03-85 з використанням формули Абрамова – Шигоріна при співвідношенні $L/B=2$ і $L/B=5$ відповідно; 3, 4 – за запропонованим методом при $L/B=2$ і $L/B=5$ відповідно; 5, 6 – за раціональним методом при $L/B=2$ і $L/B=5$



а



б

Рис. 4. Залежності розрахункової витрати дощового стоку Q_r від площі басейну стоку F за запропонованим методом: а – при $i_0=0,01$ залежно від L/B :

1 – при співвідношенні $L/B=2$; 2 – при $L/B=3$; 3 – при $L/B=4$; 4 – при $L/B=5$; 5 – $L/B=10$;
 б – при $L/B=4$ залежно від i_0 : 1 – при $i_0=0,01$; 2 – при $i_0=0,02$; 3 – при $i_0=0,03$; 4 – при $i_0=0,04$; 5 – $i_0=0,05$

Висновки. Порівняльний аналіз чинних методів розрахунку максимальної витрати дощового стоку показав, що у вітчизняних і закордонних методиках існують істотні розбіжності. Чинна вітчизняна методика не враховує зворотного впливу часу концентрації на інтенсивність розрахункового дощу.

У роботі отримано залежність (21) для розрахунку максимальної витрати дощових стічних вод від розрахункового дощу певної повторюваності з урахуванням змінної швидкості руху потоку та взаємозв'язку між часом концентрації дощового стоку та розрахунковою інтенсивністю випадання дощу.

Запропонований метод у досліджуваному діапазоні значень n_1 , L_{con} , i_0 дає результати, близькі до результатів за методом (1) з використанням формули Абрамова – Шигоріна для обчислення часу поверхневої концентрації t_{con} . При малих значеннях F запропонований метод дає значення розрахункової витрати менше на 7–11 %, ніж метод (1), а при площах, більших за 0,1-0,15 га – більше на 6–9 %, ніж метод (1).

1. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. 2. Калицун В.И. Водоотводящие системы и сооружения: Учеб. пособие. – М.: Стройиздат, 1987. – 336 с. 3. Отведение и очистка поверхностных сточных вод: Учеб. пособие для вузов / В.С. Дикаревский, А.М. Курганов, А.П. Нечаев, М.И. Алексеев. – Л.: Стройиздат, 1990. – 224 с. 4. Временные рекомендации по проектированию сооружений для очистки поверхностного стока с территорий промышленных предприятий и расчету условий выпуска его в водные объекты. – М.: ВНИИ "ВОДГЕО" Госстроя СССР, 1982. 5. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. – М.: ФГУП "НИИ ВОДГЕО", 2006 – 57 с. 6. Курганов А.М. Закономерности движения воды в дождевой и общесплавной канализации. – М.: Стройиздат, 1982. – 72 с. 7. Жук В.М. Час поверхневої концентрації стоку для дощів постійної інтенсивності та лінійних басейнів стоку // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2005. – № 537: Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. – С. 73–81. 8. Drainage Manual / Virginia Department of Transportation. Commonwealth of Virginia. – 2002. 9. Mays L.W. Stormwater collection systems design handbook / L.W. Mays. – McGraw-Hill Professional, 2001. – 1008 p. 10. Corbitt R.A. Standard Handbook of Environmental Engineering. – McGraw-Hill Education, 1998. – 1532 p. 11. Urban Hydrology for Small Watersheds. TR-55. – United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, 1986. – 164 p.