

В.М. Жук, канд. техн. наук,

І.Ю. Попадюк,

І.І. Матлай,

В.Г. Павлишин

Національний університет "Львівська політехніка"

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОГРАФІВ ПРИТОКУ ДОЩОВИХ СТИЧНИХ ВОД З ЛІНІЙНИХ У ПЛАНІ БАСЕЙНІВ СТОКУ

Получены экспериментальные гидрографы притока дождевых сточных вод из линейных в плане бассейнов стока для дождей с разной интенсивностью. Экспериментально уточнено зависимость времени поверхностной концентрации от интенсивности дождя.

Experimental stormwater hydrographs for the linear watersheds for rains with different intensity are presented in this paper. The dependence of overland travel time from the rain intensity was verified.

Вступ

Робота систем дощового водовідведення населених пунктів та промислових підприємств суттєво впливає на екологічний стан навколишнього середовища. Одним із важливих етапів проектування мереж та споруд дощового водовідведення є розрахунок гідрографів притоку дощових стічних вод.

Дослідженням гідрографів притоку дощових стічних вод займалися Калицин В.И. [1], Дикаревський В.С. [2], Алексеев М.И. [3], Курганов А.М. [4]. Гідрографи дощового стоку моделювалися, виходячи з принципів методу граничних інтенсивностей, тобто приймалось, що інтенсивність дощу змінюється в часі за спадним степеневим законом. Також можна виділити праці Чоу [5], Гуо [6], Кербі [7], Кірпіха [8]. Найбільш відомими є метод кінематичної хвилі [6], а також табличний метод, представлений у нормативному документі TR-55 служби охорони ґрунтів США (SCS USDA) [9].

Важливе значення має науково обґрунтоване моделювання гідрографів, у якому мають бути враховані географічні, топогеодезичні та інші особливості об'єкта проектування. Сьогодні актуальним є розроблення нових підходів до моделювання поверхневого стоку та удосконалення методів побудови гідрографів притоку з урахуванням максимально можливої кількості дотичних факторів.

У роботах [10], [11] було розроблено удосконалену математичну модель концентрування дощового стоку з різних по формі басейнів стоку для дощів постійної в часі інтенсивності з урахуванням змінної по довжині басейна швидкості течії. Для лінійних у плані басейнів стоку аналітично отримано узагальнений гідрограф притоку в безрозмірних змінних:

$$Q_1 = X^\alpha, \quad (1)$$

$$Q_2 = 1, \quad (2)$$

$$Q_3 = 1 - (X - X_0)^\alpha, \quad (3)$$

де Q_1, Q_2, Q_3 — безрозмірні витрати дощового стоку для першого, другого і третього етапу гідрографа відповідно; $Q = Q'/Q_r$; Q_r — максимальна витрата дощового стоку; $X = t/t_r$ — безрозмірний поточний час; α — показник степеня. Для першого етапу гідрографа $X \leq 1$, для другого — $1 < X \leq X_0$, для третього — $X_0 < X < (X_0 + 1)$; згідно з [5] показник степеня $\alpha = 1,625 - 1,714$ для турбулентного режиму руху та $\alpha = 3$ — для ламінарного.

Час концентрації стоку за умови однорідності басейна стоку [11]

$$t_r = t_{con} = (z + 1) \left(\frac{n_1 L}{\sqrt{i}} \right)^{\frac{1}{1+z}} \cdot (\psi_{mid} q_0)^{-\frac{z}{1+z}}, \quad (4)$$

де n_1 — коефіцієнт шорсткості поверхні басейна стоку; i — похил басейна стоку; ψ_{mid} — коефіцієнт стоку; q_0 — інтенсивність дощу; L — довжина басейна стоку; z — показник степеня; за Маннінгом $z = 2/3$, а за Павловським

$$z = 0,37 + 2,5\sqrt{n_1} - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n_1} - 0,1), \quad (5)$$

де R — гідравлічний радіус потоку.

Тема гідрографів притоку достатньо глибоко досліджена теоретично. Проте досі актуальним залишається експериментальне дослідження гідрографів для різних окремо взятих випадків. Наприклад, у роботі [12] виконано детальне експериментальне дослідження плівкової течії по шорсткій водонепроникній поверхні, що імітувала покриття автостради. У результаті отримано математичну модель з одним параметром, який безпосередньо пов'язаний з шорсткістю поверхні.

Мета роботи: експериментальне дослідження гідрографів притоку дощових стічних вод з лінійних у плані басейнів стоку при різних інтенсивностях дощу.

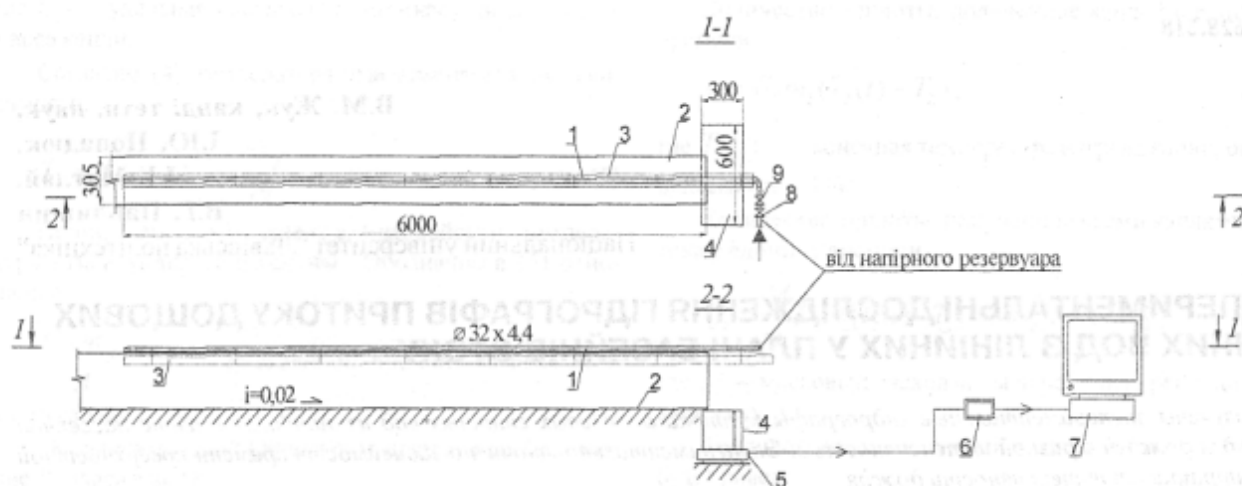


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 — розподільний трубопровід; 2 — збірний лоток; 3 — перехоплювальний лоток; 4 — приймальний резервуар; 5 — електронна вага; 6 — цифровий інтерфейс RS-232; 7 — ЕОМ; 8 — вентиль; 9 — кульовий кран.

Експериментальні дослідження

Для експериментального дослідження гідрографів притоку дощових стічних вод було запроєктовано і змонтовано установку, схему якої показано на рис. 1. Ця установка дозволяє експериментально отримувати гідрографи притоку з лінійних в плані басейнів стоку при різних інтенсивностях дощу, різних похилах і коефіцієнтах шорсткості поверхні.

Модельний дощ постійної в часі інтенсивності здійснювався за допомогою розподільного трубопроводу 1, з'єднаного з напірним резервуаром. Трубопровід 1 довжиною 6 м виготовлено з поліпропіленових труб PP-R 32 x 4,4, у яких рівномірно по довжині з кроком 5 см зроблено отвори діаметром 2 мм. Після витікання з трубопроводу 1 вода потрапляла у збірний лоток 2 шириною 305 мм, який використовувався як модель басейна стоку. Збірний лоток 2 оснащений підйомним механізмом, що дає можливість вивчати гідрографи притоку при різних похилах басейна стоку.

Тип поверхневого покриття басейна стоку можна змінювати настилянням матеріалів з різною шорсткістю поверхні. У даній серії експериментів поверхня басейна була викладена з листів ПВХ з коефіцієнтом шорсткості $n_1=0,009$, а поздовжній похил лотка становив $i=0,02$.

Стікаючи лотком 2, вода потрапляла у приймальний резервуар 4, виконаний з листів ПВХ товщиною 5 мм. Внутрішні розміри резервуара 4 — 598x304x250 мм, а робочий об'єм становить 45 л.

Для точного визначення зміни в часі кількості води у резервуарі 4 використовувалась електронна вага 5 марки AXIS BDU-60, обладнана цифровим інтерфейсом 6 RS-232, який дозволяє в режимі реального часу передавати на персональний комп'ютер дані про поточне значення маси рідини в резервуарі. Похибка вимірювання маси вагою AXIS BDU-60 становила ± 10 г. Біжучі значення маси рідини виводилися у файл даних кожних 0,125 с.

Для забезпечення однакової інтенсивності модельного дощу по всій довжині басейна стоку від самого почат-

ку експерименту використовувався перехоплювальний лоток 3. Він виконаний з труби марки PVC-75x2,5 довжиною 7 м і за допомогою гнучких рухомих опор встановлений під розподільним трубопроводом. Після запуску системи вода з розподільного трубопроводу 1 потрапляла у перехоплювальний лоток 3 і відводилася за межі басейна стоку в обхід резервуара 4. Коли витрата води по всій довжині розподільного трубопроводу вирівнювалась, що перевірялося за допомогою мірних циліндрів, лунала команда «пуск», після якої перехоплювальний лоток 3 відводився в сторону і запускалось програмне забезпечення цифрового інтерфейсу 6 на комп'ютері 7. У кінці кожного дослідження вимірювали температуру води у приймальному резервуарі 4.

Витрата Q , регулювалася вентилем 8; пуск і зупинку модельного дощу здійснювали за допомогою кульового крана 9.

Числові значення витрати притоку Q , знаходили з високою точністю як похідну від лінійної залежності на другому етапі кривої об'ємів (при $t_1 < t < t_2$):

$$Q_2 = \frac{dW_2}{dt} \quad (6)$$

Витрата притоку дощових вод Q , змінювалася в межах від 0,350 л/с до 1,09 л/с, що відповідає інтенсивності дощу від $1,7 \cdot 10^{-4}$ м/с до $5,9 \cdot 10^{-4}$ м/с.

Закон зміни витрати притоку на першому етапі знаходили диференціюванням степеневої функції, що описує перший етап відповідної кривої об'єму притоку:

$$Q_1 = \frac{dW_1}{dt} \quad (7)$$

Для підвищення достовірності експериментальних досліджень виконувалось по чотири пуски для кожного значення витрати притоку дощових стічних вод Q . Відносна похибка вимірювання значень витрати Q , не перевищувала 1,5 %.

Експериментальні гідрографи притоку

На рис. 2 представлені типові експериментальні криві об'ємів притоку, отримані для лінійного басейна стоку при різних значеннях інтенсивності модельного дощу. Різними кольорами відзначені 1-й, 2-й і 3-й етапи гідрографа. Час поверхневої концентрації визначався експериментально як час переходу степеневої кривої 1-го етапу в пряму на кривій об'ємів, що має місце для другого етапу.

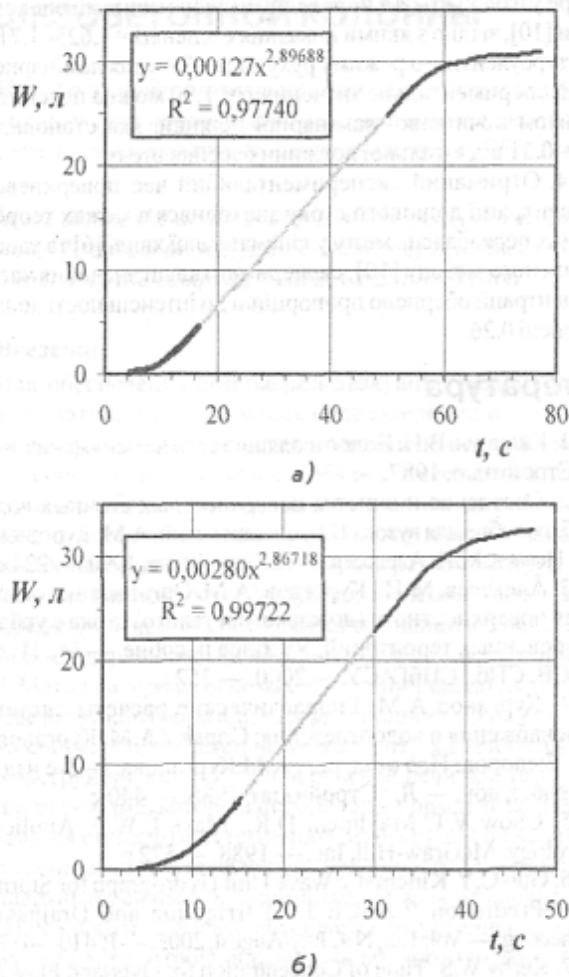


Рис. 2. Типові експериментальні криві об'ємів притоку дощових стічних вод, отримані за допомогою електронної ваги BDU-60 з цифровим інтерфейсом RS-232 для $L = 6$ м; $i = 0,02$; $n_1 = 0,009$: а) $Q_1 = 0,615$ л/с $Q_2 = 0,615$ л/с; б) $Q_3 = 1,08$ л/с.

В ході досліджень були отримані експериментальні гідрографи притоку. На рис. 3 представлені типові гідрографи, отримані методом чисельного диференціювання експериментальних кривих об'ємів $W = W(t)$.

Експериментальні гідрографи зводили до узагальненого безрозмірного вигляду. Для кожного значення об'ємної витрати Q , будували об'єднані безрозмірні гідрографи притоку, перший етап яких добре апроксимується степеневою залежністю (1). На рис. 4 і 5 представлено залежності показника степеня α у законі зміни витрати притоку (1) від розрахункової витрати дощового стоку Q , і від відносної довжини початкової ламінарної ділянки відповідно.

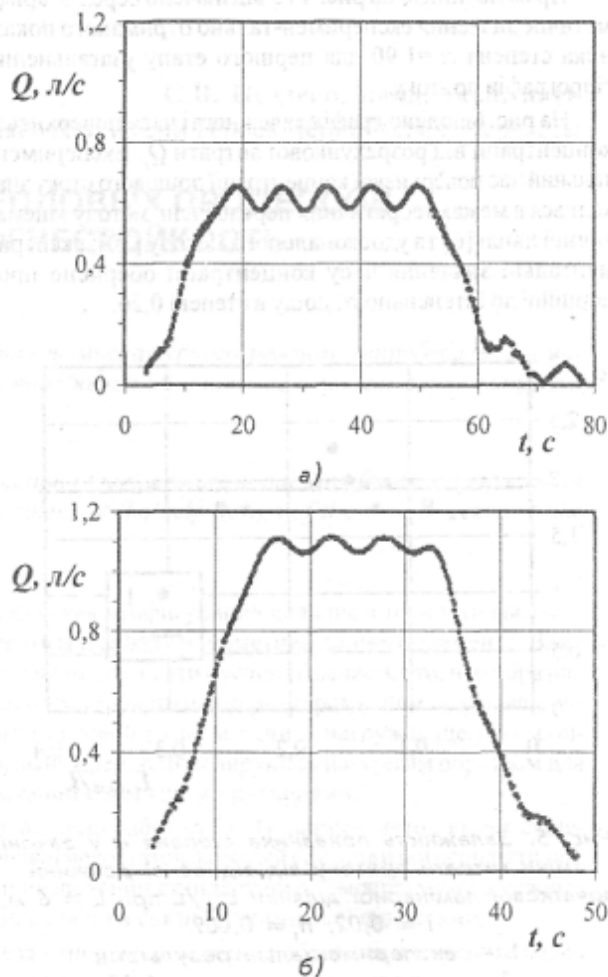


Рис. 3. Типові гідрографи притоку дощових стічних вод, отримані чисельним диференціюванням експериментальних кривих об'ємів $W = W(t)$ для $L = 6$ м; $i = 0,02$; $n_1 = 0,009$: а) $Q_1 = 0,615$ л/с $Q_2 = 0,615$ л/с; б) $Q_3 = 1,08$ л/с.

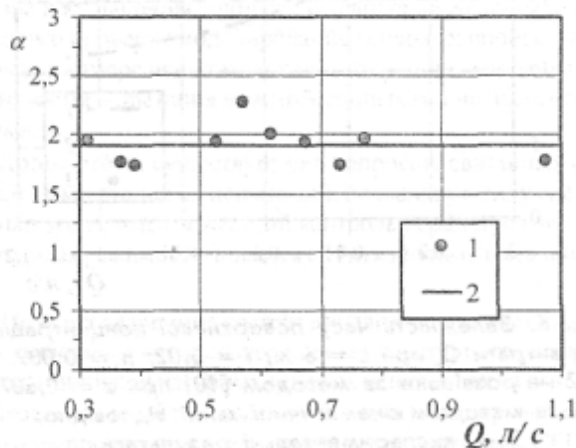


Рис. 4. Залежність показника степеня α у законі зміни витрати притоку (1) від розрахункової витрати модельного дощового стоку Q , при $L = 6$ м; $i = 0,02$; $n_1 = 0,009$: 1 — експериментальні результати; 2 — середнє значення $\alpha_{\text{ср}} = 1,90$.

Прямою лінією на рис. 4 і 5 відзначено середнє арифметичне значення експериментально отриманого показника степеня $\alpha = 1,90$ для першого етапу узагальнених гідрографів притоку.

На рис. 6 подано графік залежності часу поверхневої концентрації від розрахункової витрати Q_r . Експериментальний час поверхневої концентрації дощового стоку знаходився в межах теоретичних передбачень методу кінематичної хвилі [6] та удосконаленого методу [10]; експериментальні значення часу концентрації обернено пропорційні до інтенсивності дощу в степені 0,26.

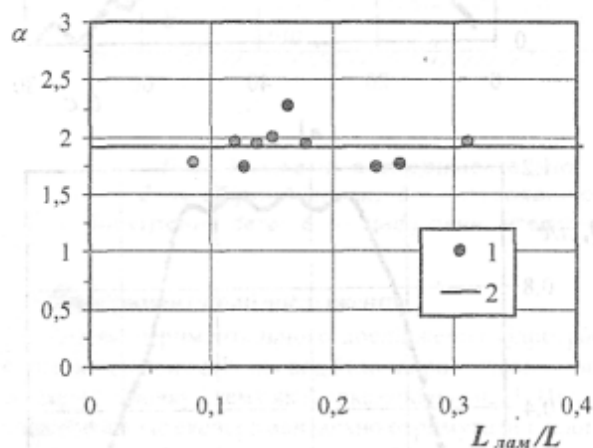


Рис. 5. Залежність показника степеня α у законі зміни витрати притоку від відносної довжини початкової ламінарної ділянки $L_{\text{лам}}/L$ при $L = 6$ м; $i = 0,02$; $n_s = 0,009$:
1 — експериментальні результати;
2 — середнє значення $\alpha_{\text{ср}} = 1,90$.

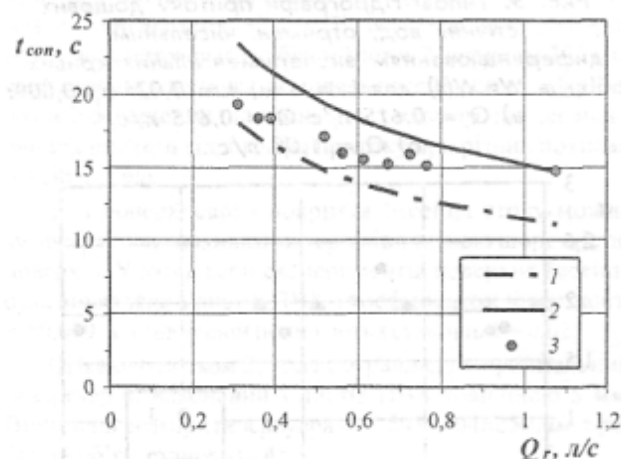


Рис. 6. Залежність часу поверхневої концентрації від витрати Q_r при $L = 6$ м; $i = 0,02$; $n_s = 0,009$:
1, 2 — розв'язки за методом [10] при $z = 0,607$ і за методом кінематичної хвилі відповідно;
3 — експериментальні результати.

Висновки

1. Виконано серію експериментальних досліджень в режимі on-line; отримано гідрографи притоку дощових стічних вод з модельного лінійного в плані басейна стоку з пост-

ійним поздовжнім похилом $i = 0,02$ та коефіцієнтом шорсткості $n_s = 0,009$ для дощів постійної в часі інтенсивності, яка змінювалась в межах від $1,7 \cdot 10^{-4}$ м/с до $5,9 \cdot 10^{-4}$ м/с.

2. Побудовані та проаналізовані криві об'ємів притоку, а також розмірні та безрозмірні гідрографи стоку для зазначених умов.

3. Експериментально отримано, що на першому етапі узагальненого гідрографа притоку безрозмірна витрата пропорційна до безрозмірного часу в степені $\alpha = 1,90$. Це добре узгоджується з попередніми теоретичними висновками [10], згідно з якими показник степеня $\alpha = 1,625-1,714$ для турбулентного режиму руху та $\alpha = 3$ — для ламінарного. Експериментальне значення $\alpha = 1,90$ можна пояснити впливом початкової ламінарної ділянки, яка становила 0,09–0,31 від загальної довжини басейна стоку.

4. Отриманий експериментальний час поверхневої концентрації дощового стоку знаходився в межах теоретичних передбачень методу кінематичної хвилі [6] та удосконаленого методу [10]; експериментальні значення часу концентрації обернено пропорційні до інтенсивності дощу в степені 0,26.

Література

1. Калицун, В.И. Водоотводящие сети и сооружения. — М.: Стройиздат, 1987. — 336 с.
2. 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.
3. Алексеев, М.И., Курганов, А.М. Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий: Учебное пособие. — М.: Изд-во АСВ; СПб.: СПбГАСУ. — 2000. — 352 с.
4. Курганов А.М. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения: Справ. / А.М. Курганов, Н.Ф. Федоров; Под общ. ред. А.М.Курганова. — 3-е изд., перераб. и доп. — Л.: Стройиздат, 1986. — 440 с.
5. Chow V.T, Maidment D.R., Mays L.W. // Applied Hydrology: McGraw-Hill, Inc. — 1988. — 572 p.
6. Guo C.Y. Kinematic Wave Unit Hydrograph for Storm Water Prediction // ASCE J. of Irrigation and Drainage Engineering. — Vol. 132, N 4, July/August, 2005. — P. 410—417.
7. Kerby W.S. Time of Concentration for Overland Flow // Civil Engineering. — Vol. 29, March, 1959. — P. 174.
8. Kirpich Z.P. Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds // Civil Engineering. — Vol. 10, June, 1940. — P. 362.
9. Urban Hydrology for Small Watersheds. TR-55. — United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, 1986. — 164 p.
10. Жук В.М. Гідрографи притоку для дощів постійної в часі інтенсивності та лінійних басейнів стоку // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка", "Теорія і практика будівництва". — 2007. — № 602. — С. 61—65.
11. Жук, В.М., Рутковська, І.З., Вовк, Л.І., Омеляк Ю.П. Час поверхневої концентрації дощових вод в басейнах з постійним похилом для дощів постійної в часі інтенсивності // Пожежна безпека. — 2005. — № 7 — С. 112—118.
12. Charbeneau R.J., Jeong J., Barrett M.E. Physical Modeling of Sheet Flow on Rough Impervious Surfaces // ASCE J. Hydr. Engrg. — Vol. 135, Iss. 6, 2009. — P. 487—494.

Надійшла 28.09.2010 р.