

ГІДРОГРАФИ ПРИТОКУ ДЛЯ ДОЩІВ ПОСТІЙНОЇ В ЧАСІ ІНТЕНСИВНОСТІ ТА ЛІНІЙНИХ БАСЕЙНІВ СТОКУ

© Жук В.М., 2007

Аналітично отримано гідрографи притоку атмосферних стічних вод з лінійних в плані басейнів стоку для дощів постійної в часі інтенсивності за різних зон гідравлічного опору. Отримано відповідні вирази для обчислення часу концентрації поверхневого стоку.

Stormwater hydrographs for the linear watersheds and rains with constant intensity at the different hydraulic friction regions are derived analytically in the paper. The consequent formulas for the time of concentration of the surface flow are obtained.

Постановка проблеми. Розрахунок гідрографів притоку дощових стічних вод є важливим етапом проектування ємнісних споруд систем дощового водовідведення: регулювальних резервуарів, приймальних камер насосних станцій, розподільвальних камер тощо. Сьогодні є актуальним розроблення нових науково обґрунтованих підходів до моделювання поверхневого стоку та удосконалення відомих методів побудови гідрографів притоку з урахуванням більшої кількості дотичних факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У чинних вітчизняних методиках побудови гідрографів притоку дощових стічних вод для математичного моделювання нестационарного поверхневого потоку приймають багато спрощень і припущень. Інтенсивність дощу приймається постійною в часі, басейн стоку наближено вважається однорідним і лінійним у плані, швидкість поверхневого потоку приймається однаковою у всіх точках басейну, а коефіцієнт поверхні – однаковим по площі басейну та незмінним у часі.

За вказаних спрощень гідрограф притоку являє собою рівносторонню трапецію (рис. 1), і саме такий наближений гідрограф притоку використовується в інженерних методиках для визначення регулювального об'єму ємнісних споруд систем дощового та загальносплавного водовідведення [1, 2]. Безрозмірний узагальнений гідрограф описується рівняннями (1–3):

$$Q' = X \quad \text{при } X \leq 1; \quad (1)$$

$$Q' = 1 \quad \text{при } 1 < X \leq X_0; \quad (2)$$

$$Q' = X_0 + 1 - X \quad \text{при } X_0 < X \leq (X_0 + 1), \quad (3)$$

де $Q' = Q/Q_r$ – безрозмірна витрата дощового стоку; Q_r – максимальна витрата дощового стоку; X, X_0 – безрозмірний поточний час, $X = t/t_r$; t_r – час концентрації поверхневого стоку; X_0 – безрозмірна тривалість дощу, $X_0 = t_0/t_r$.

Для дощів постійної в часі інтенсивності:

$$Q_r = Z_{mid} q_0 F, \quad (4)$$

де Z_{mid} – середній за площею коефіцієнт поверхні басейну стоку; q_0 – постійна в часі інтенсивність дощу, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; F – загальна площа басейну стоку.

Як показано в [3, 4], врахування змінної по довжині басейну стоку швидкості поверхневого потоку з використанням формули Павловського приводить до узагальненого гідрографа притоку у вигляді деформованої трапеції. Перший етап такого гідрографа тоді описується рівнянням

$$Q' = X^{(1+z)},$$

де z – показник степеня у формулі Павловського для визначення коефіцієнта Шезі:

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

де n_1 – коефіцієнт шорсткості поверхні; R – гідравлічний радіус.

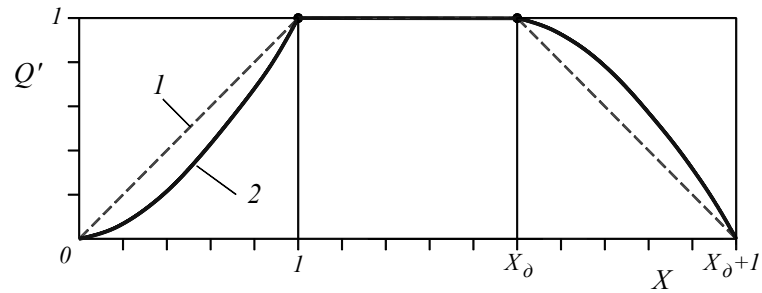


Рис. 1. Гідрограф притоку в безрозмірних координатах для дощу постійної в часі інтенсивності та лінійного басейну стоку: 1 – наближений гідрограф за умови $V=const$; 2 – уточнений гідрограф за врахування зміни швидкості по довжині басейну стоку

На другому етапі безрозмірна витрата $Q'=1$. На третьому етапі:

$$Q' = 1 - (X - X_{\delta})^{1+z}$$

Проте формула Павловського може застосовуватися лише для квадратичної зони гідравлічного опору, тоді як на верхніх ділянках басейну стоку існує ламінарний режим течії, а вниз по потоку – гладкостінна доквадратична та квадратична зони опору турбулентного режиму руху.

Мета роботи – отримати узагальнені розрахункові залежності для побудови гідрографів притоку дощових стічних вод з лінійних в плані басейнів стоку для дощів постійної в часі інтенсивності для різних режимів течії та різних зон гідравлічного опору.

Результати досліджень. Ламінарний режим руху поверхневого потоку.

Розглянемо поверхневий потік, коли витрата у розрахунковому перерізі (точка А на рис. 2) формується з усього басейну стоку (що відповідає другому етапу гідрографа притоку). Витрата дощових вод у довільному перерізі з координатою x :

$$Q(x) = Z_{mid} q_0 Bx \tag{5}$$

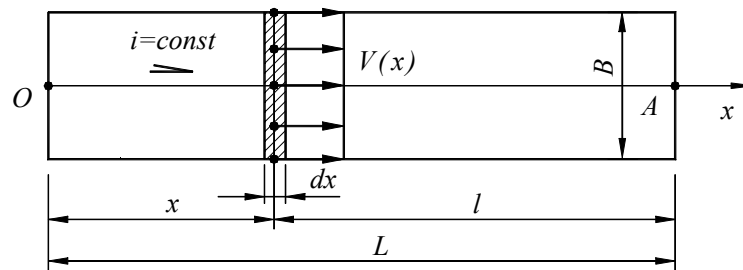


Рис. 2. Схема поверхневої концентрації дощових вод для лінійного басейну стоку з постійним похилом

Для стаціонарного потоку ньютонівської рідини у відкритому руслі великої ширини ($B \gg h$) гідравлічний радіус потоку дорівнює його глибині ($R=h$), а середня швидкість потоку в поперечному перерізі виражається аналітичною залежністю

$$V = \frac{g h^2}{6\nu}$$

де ν – кінематична в'язкість рідини, m^2/s .

Враховуючи, що об'ємна витрата в перерізі з координатою x дорівнює

$$Q(x) = V(x) B h(x),$$

отримаємо

$$h(x) = \left(\frac{6Z_{mid}q_0vx}{gI} \right)^{1/3}.$$

Залежність середньої швидкості від координати перерізу:

$$V(x) = \left(\frac{gI}{6v} \right)^{1/3} (Z_{mid}q_0x)^{2/3}.$$

Час течії поверхневого потоку на нескінченно малому відрізку завдовжки dx :

$$dt = \frac{dx}{V(x)} = \left(\frac{gI}{6v} \right)^{-1/3} (Z_{mid}q_0x)^{-2/3} dx. \quad (6)$$

Інтегруючи (6), можна отримати час поверхневої концентрації для лінійного в плані басейну стоку у разі дощу сталої в часі інтенсивності за ламінарного режиму руху поверхневого потоку:

$$t_r = \int_0^L \frac{dx}{V(x)} = 3 \sqrt[3]{\frac{162vL}{Z_{mid}^2q_0^2gI}}. \quad (7)$$

Відповідно час концентрації стоку з ділянки завдовжки l (рис. 2):

$$t_l = 3 \sqrt[3]{\frac{162vl}{Z_{mid}^2q_0^2gI}}. \quad (8)$$

З рівнянь (7) і (8)

$$(t_l / t_r) = (l / L)^{1/3}. \quad (9)$$

Оскільки витрата дощового стоку для дощу з постійною в часі інтенсивністю пропорційна до довжини лінійного басейну, то отримаємо залежність витрати в розрахунковому перерізі від часу для першого етапу ($t < t_r$):

$$Q' = Q / Q_r = (l / L) = (t / t_r)^3 = X^3. \quad (10)$$

Враховуючи аналогічні міркування, для третього етапу гідрографа отримаємо

$$Q' = 1 - (X - X_0)^3. \quad (11)$$

Безрозмірний гідрограф для ламінарного режиму руху показано на рис. 3.

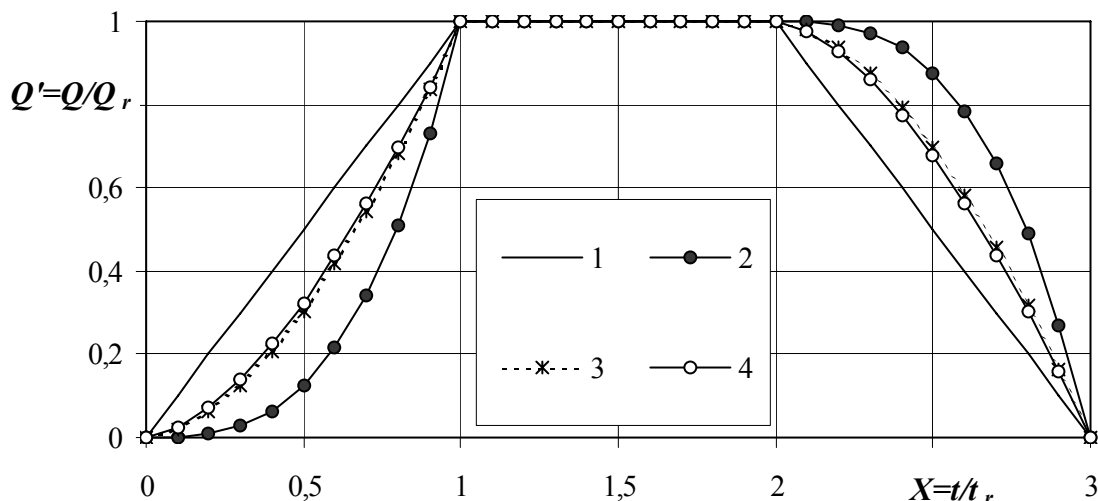


Рис. 3. Безрозмірні гідрографи притоку дощових стічних вод з лінійних басейнів стоку для дощів постійної в часі інтенсивності за різних гідравлічних режимів і зон опору за $X_0=2$:
1 – спрощений за $V=\text{const}$; 2 – для ламінарного режиму руху;
3 – для гладкостінної зони опору турбулентного режиму; 4 – для квадратичної зони опору

Оцінимо порядок протяжності ламінарного режиму руху поверхневого стоку. Критерій Рейнольдса для відкритого потоку виражений через гідравлічний радіус:

$$Re_R = \frac{Q}{B\nu}.$$

Приймаючи критичне значення числа Рейнольдса $(Re_R)_{кр}=300-500$, а кінематичну в'язкість поверхневого стоку $\nu=1,31$ сСт, отримаємо, що критична питома витрата на одиницю ширини становить $Q_{кр}/B=0,393-0,655$ л/(см).

Критична довжина ламінарного поверхневого потоку

$$L_{кр} = \frac{(Re_R)_{кр} \nu}{Z_{mid} q_o}. \quad (12)$$

Наприклад, за інтенсивності дощу $q_o=100$ л/(с·га) і $Z_{mid}=0,5$: $L_{кр}=(79-131)$ м, що достатньо добре узгоджується з нормативним документом [5], що діє у США, відповідно до якого перші 300 футів поверхневий потік являє собою так званий плівковий потік, що враховується в гідравлічному розрахунку дощової мережі.

Аналіз показує, що довжина ділянки ламінарного режиму для реальних поверхневих потоків становить порядку 100 м. Отже, значна частина площі басейну стоку у верхній його частині "працює" за ламінарного режиму руху, що обов'язково повинно враховуватися під час визначення часу поверхневої концентрації, розрахункової витрати та гідрографів притоку дощових вод.

Гладкостінна зона опору турбулентного режиму руху.

За більших витрат поверхневий потік переходить у турбулентний режим руху, для якого залежно від значення числа Рейнольдса та відносної шорсткості поверхні можливі три зони гідравлічного опору.

Середня швидкість течії поверхневого потоку може бути виражена через коефіцієнт гідравлічного тертя λ в такий спосіб:

$$V = C\sqrt{RI} = \sqrt{8ghI/\lambda}. \quad (13)$$

Для гладкостінної зони опору у відкритих каналах згідно з [6] коефіцієнт гідравлічного тертя є пропорційним до $Re^{-0,25}$:

$$\lambda_{2r} \cong (Vh)^{-0,25}. \quad (14)$$

З рівнянь (13) і (14) випливає зв'язок між швидкістю і глибиною у вигляді

$$V(x) \cong h(x)^{5/7}.$$

Аналогічно до розв'язку для ламінарного режиму руху отримаємо

$$V(x) \cong x^{5/12};$$

$$t_r \cong L^{7/12},$$

звідки безрозмірна витрата для першого етапу гідрографа притоку дощових вод:

$$Q' = Q/Q_r = (l/L) = (t/t_r)^{12/7} = X^{12/7} \approx X^{1,714}. \quad (15)$$

Для третього етапу гідрографа, враховуючи умови симетрії концентрації та стоку поверхневого потоку:

$$Q' = 1 - (X - X_\partial)^{12/7}. \quad (16)$$

Квадратична і доквадратична зони опору турбулентного режиму руху.

У квадратичній зоні опору коефіцієнт гідравлічного тертя

$$\lambda_{кв} \cong h^{-0,25}, \quad (17)$$

звідки $V(x) \cong h(x)^{5/8}$; $V(x) \cong x^{5/13}$; $t_r \cong L^{8/13}$, і зрештою, безрозмірна витрата:

$$Q' = X^{13/8} = X^{1,625}. \quad (18)$$

Для третього етапу

$$Q' = 1 - (X - X_\partial)^{13/8}. \quad (19)$$

Враховуючи перехідний характер доквадратичної зони опору від гладкостінної до квадратичної, для цієї зони безрозмірна витрата на першому етапі гідрографа:

$$Q' = X^\alpha, \quad (20)$$

де $13/8 < \alpha < 12/7$.

Варто зазначити, що до цього діапазону потрапляють значення показника степеня у безрозмірному гідрографі притоку, які випливають зі спрощених степеневих формул Маннінга та Форхгеймера (відповідно $\alpha = 5/3 = 1,667$ та $\alpha = 1,7$).

Для третього етапу гідрографа притоку для доквадратичної зони опору:

$$Q' = 1 - (X - X_0)^\alpha. \quad (21)$$

Безрозмірні об'єми дощового стоку.

На першому етапі гідрографа притоку дощових вод для розглянутих умов безрозмірний об'єм дощового стоку становить

$$W'_1 = \int_0^1 Q' dX = \frac{X^{\alpha+1}}{\alpha+1} \Big|_0^1 = \frac{1}{\alpha+1}. \quad (22)$$

Для спрощеної моделі ($V = \text{const}$) – $W'_1 = 0,5$; для квадратичної зони опору – $W'_1 = 0,381$; для гладкостінної зони – $W'_1 = 0,368$; для ламінарного режиму руху – $W'_1 = 0,25$.

Висновки. У роботі проаналізовано вплив режиму руху поверхневого потоку, а також зони гідравлічного опору турбулентного режиму руху на гідрографі притоку дощових вод з лінійних у плані басейнів стоку для дощів постійної в часі інтенсивності.

В усіх випадках гідрографі притоку на першому та третьому етапах можуть бути описані відповідно степеневими формулами (20) і (21). Показник степеня α становить: для ламінарного режиму $\alpha = 3$; для гладкостінної зони опору – $\alpha = 12/7 = 1,714$; для доквадратичної зони – $13/8 < \alpha < 12/7$; для квадратичної зони – $\alpha = 13/8 = 1,625$.

В усіх чотирьох розглянутих випадках гідрографі притоку на першому і третьому етапах істотно відрізняються від прямолінійних графіків для спрощеного розв'язку без врахування зміни швидкості поверхневого потоку по довжині басейну стоку. Розв'язки для трьох зон гідравлічного опору турбулентного режиму дуже близькі між собою (рис. 3), тоді як для ламінарного режиму характерний значно вищий ступінь нерівномірності наростання витрати на першому етапі та зменшення витрати на третьому етапі гідрографа, що необхідно враховувати під час гідравлічних розрахунків мереж дощового водовідведення та споруд на них.

По довжині реальних басейнів стоку поверхневий потік є в різних режимах руху та працює в різних зонах гідравлічного опору. Для адекватнішого розрахунку доцільно розбивати потік на частини, що відповідають різним режимам руху, з використанням закономірностей концентрації поверхневого стоку, характерних для кожної з частин.

1. Калищун В.И. *Водоотводящие сети и сооружения*. – М.: Стройиздат, 1987. – 336 с.
2. Алексеев М.И., Курганов А.М. *Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий: Учеб. пособие*. – М.: Изд-во АСВ; СПб.: СПбГАСУ, 2000. – 352 с.
3. Жук В.М. Час поверхневої концентрації стоку для дощів постійної інтенсивності та лінійних басейнів стоку // *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*. – 2005. – № 537. – С. 73–81.
4. Жук В.М., Вовк Л.І., Малиш Б.М. Регулювальний об'єм збірників атмосферних стічних вод для дощів постійної в часі інтенсивності // *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*. – 2005. – № 545. – С. 53–60.
5. *Urban Hydrology for Small Watersheds // United States Department of Agriculture. Technical Release 55, 210-VI-TR-55, Second Ed., June 1986. – 164 p.*
6. Chow V.T, Maidment D.R., Mays L.W. *Applied Hydrology: McGraw-Hill, Inc. – 1988. – 572 p.*