

ГІДРОГРАФИ ПРИТОКУ ДОЩОВИХ СТІЧНИХ ВОД З РАДІАЛЬНИХ У ПЛАНІ БАСЕЙНІВ СТОКУ ПРИ РІЗНІЙ ІНТЕНСИВНОСТІ ДОЩУ

© Жук В.М., Попадюк І.Ю., Матлай І.І., 2008

Наведено результати теоретичного та експериментального досліджень залежності часу поверхневої концентрації та гідрографа притоку дощових стічних вод з радіальних у плані басейнів стоку від інтенсивності постійного в часі дощу. Отримані експериментальні результати добре узгоджуються із теоретичними залежностями.

The results of theoretical and experimental investigation of the dependence of the surface concentration time and storm-water hydrographs for the radial watersheds from the rainfall intensity are presented in the paper. These experimental results are in the good accordance with theoretically substantiated dependencies.

Постановка проблеми. Розрахункова витрата дощових стічних вод є одним з найважливіших параметрів, що визначають хід гідравлічного розрахунку та проектування системи дощового водовідведення. Велика кількість факторів, які впливають на значення розрахункової витрати, обумовлюють цілий ряд спрощень і наближень, що використовуються у діючих сьогодні методиках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із припущень є незалежність розрахункової витрати дощових стічних вод від конфігурації басейна стоку в плані [1, 2]. У роботі [3] теоретично обґрунтовано радіальну модель концентрації поверхневого стоку, у якій басейн стоку приймається у вигляді кругового сектора. Показано, що за однакових інтенсивності дощу, площі та видів покриття басейну стоку розрахункова витрата для радіальної моделі приблизно в 1,5 раза більша, ніж для лінійної моделі, в якій басейн стоку приймається у вигляді витягнутого прямокутника, та в 1,5–1,7 раза більша, ніж за діючою нормативною моделлю, поданою в [1]. У роботі [4] показано, що від конфігурації басейну стоку залежить також значення часу концентрації дощових стічних вод. Аналітично отримано формулу для обчислення часу поверхневої концентрації для радіальних басейнів стоку з врахуванням змінної швидкості течії поверхневого потоку, а також встановлено, що для дощів постійної в часі інтенсивності і за умови наявності квадратичної області гідравлічних опорів час концентрації поверхневого стоку для радіальних в плані басейнів стоку становить 0,84–0,85 від відповідного часу для лінійного басейну стоку однакової протяжності та площі.

Мета та задачі досліджень. Метою роботи є теоретичний аналіз і систематичне експериментальне дослідження залежності гідрографів притоку дощових стічних вод з радіальних в плані басейну стоку від величини інтенсивності постійного в часі дощу. Задачі дослідження: отримання теоретичних та експериментальних графіків притоку дощових стічних вод з радіальних басейнів стоку у широкому діапазоні зміни інтенсивності дощу; встановлення залежності часу поверхневої концентрації дощового стоку від інтенсивності дощу для радіальних басейнів стоку; отримання безрозмірних (узагальнених) гідрографів притоку для радіальних в плані басейнів стоку.

Теоретичний аналіз. У роботі [4] показано, що для радіального в плані басейну стоку за постійної в часі інтенсивності випадання дощу і квадратичній області гідравлічних опорів час поверхневої концентрації може бути визначений за теоретичною формулою

$$t_{con} = \int_{r_0}^{R_p} \frac{dr}{V(r)} = \left(\frac{n}{\sqrt{i}} \right)^{\frac{1}{1+z}} \left(\frac{2}{Z_{mid} q_o} \right)^{\frac{z}{1+z}} \cdot I_1, \quad (1)$$

де R_o, r_o – відповідно радіус басейну стоку та радіус приймача дощових вод (рис. 1); n – коефіцієнт шорсткості; i – геодезичний похил; Z_{mid} – коефіцієнт поверхні басейну стоку; q_o – інтенсивність дощу, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; z – показник степеня у формулі Павловського; I_1 – інтеграл, що залежить від радіуса басейна стоку, радіуса приймача дощових вод і від показника степеня z (рис. 1):

$$I_1 = \int_{r_o}^{R_o} \left(\frac{r}{R_o^2 - r^2} \right)^{z/(1+z)} dr . \quad (2)$$

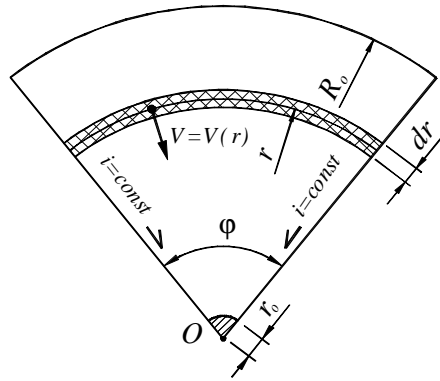


Рис. 1. Схема поверхневої концентрації дощових вод з радіального в плані басейну стоку з постійним похилом

Числовий експеримент показав, що зміна r_o від 0,5 м до 1,0 м практично не впливає на значення інтеграла I_1 для басейнів стоку радіусом 20 м і більше (рис. 2). Числове інтегрування (2) дає в результаті значення, що добре описуються степеневою функцією:

$$I_1 = m_1 (R_o)^{1/(1+z)} , \quad (3)$$

причому коефіцієнт m_1 визначається за рівнянням

$$m_1 = 0,322z + 0,858 . \quad (4)$$

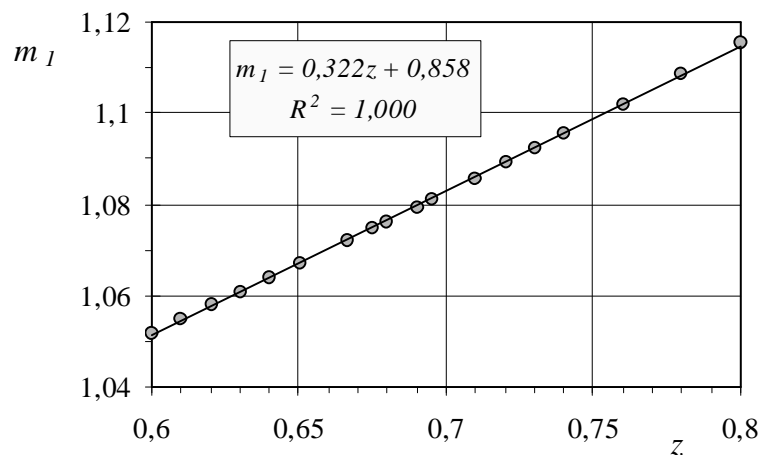


Рис. 2. Результати числового експерименту щодо залежності $m_1 = m_1(z)$

Аналогічно до (1), час поверхневої концентрації дощових вод з частини радіального басейну стоку радіусом r :

$$t' = \int_{r_o}^r \frac{dr}{V(r)} = \left(\frac{n}{\sqrt{i}} \right)^{1+z} \left(\frac{2\sqrt{i}}{Z_{mid} q_o n} \right)^{\frac{z}{1+z}} \cdot m_1 \cdot (r)^{1/(1+z)} . \quad (5)$$

Нехтуючи зміною показника степеня z за довжиною басейну стоку, отримуємо, що час поверхневої концентрації з частини радіального басейну стоку та із всього басейну співвідносяться як:

$$t' / t_{con} = \left(\frac{r}{R_o} \right)^{1/(1+z)} \quad (6)$$

З іншого боку, для дощів постійної в часі інтенсивності витрата дощових стічних вод на початку другого етапу гідрографа (коли стік формується зі всього басейну) є пропорційною до площі басейну, тобто до квадрата радіуса:

$$\frac{Q}{Q_{con}} = \left(\frac{r}{R_o} \right)^2, \quad (7)$$

де Q_{con} – розрахункова витрата зі всього басейну стоку

$$Q_{con} = Z_{mid} q_o \phi R_o^2 / 2 \quad (8)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (6) і (7), можна отримати рівняння кривої першого етапу гідрографа притоку дощових стічних вод з радіальних у плані басейнів стоку за наявності квадратичної області гідравлічних опорів:

$$\frac{Q}{Q_{con}} = \left(\frac{t}{t_{con}} \right)^{2(1+z)} \quad (9)$$

Рівняння (9) описує перший етап узагальненого гідрографа притоку в безрозмірних змінних:

$$Q' = X^{2(1+z)}, \quad (10)$$

де $Q' = Q/Q_{con}$ – безрозмірна витрата; $X = t/t_{con}$ – безрозмірний час.

Експериментальні дослідження. Для експериментальної верифікації отриманих теоретичних залежностей для часу поверхневої концентрації та першого етапу гідрографа притоку з радіальних в плані басейнів стоку була запроєктована і змонтована дослідна установка, представлена на рис. 3.

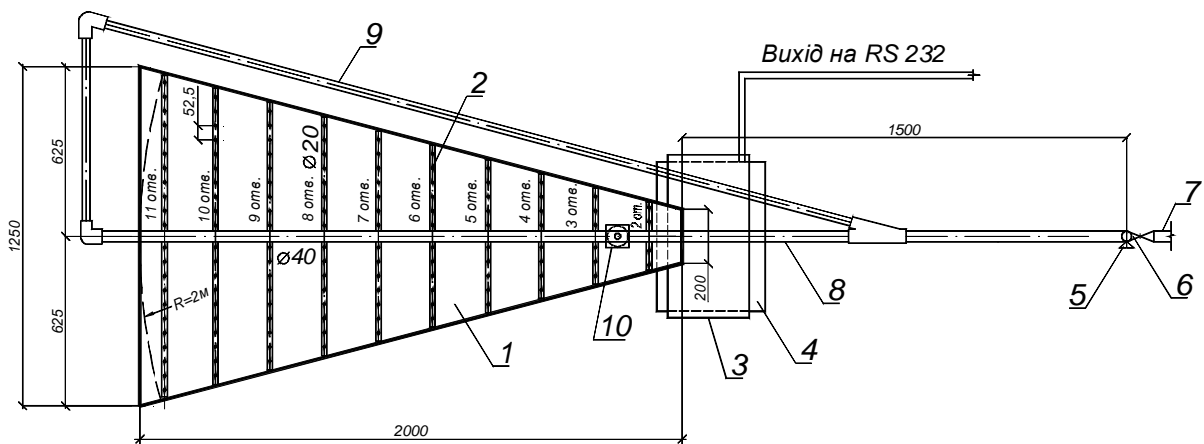


Рис. 3. Схема експериментальної установки:

- 1 – модель радіального в плані басейну стоку; 2 – розподільні труби; 3 – приймальний резервуар; 4 – електронна вага з цифровим виходом RS-232; 5 – кульовий кран; 6 – вентиль; 7 – подавальний трубопровід; 8 – магістральний трубопровід; 9 – обвідний трубопровід; 10 – домкрат

Модель радіального в плані басейну стоку 1 виготовлена з листової сталі, ретельно заґрунтована та пофарбована антикорозійною фарбою. Площа модельного басейну стоку – $F=1,45 \text{ м}^2$. Поздовжній похил басейну визначався за допомогою нівеліра, водяного рівня та мірної лінійки. Зміна похилу виконувалася гідравлічним домкратом 10.

Магістральний трубопровід 8 виготовлено з поліпропіленової труби PP-R DN40 довжиною 3 м, у яку впаяно 20 поліпропіленових розподільних труб PP-R DN20 різних довжин. У розподільних трубах з кроком 52,5 мм просвердлено 130 отворів діаметром 2 мм, які рівномірно розподілені над моделлю радіального басейну стоку. За допомогою цього трубопроводу імітувався дощ постійної в часі інтенсивності. Для забезпечення рівномірної по площі інтенсивності випадання модельного “дощу” по площі басейну додатково змонтовано обвідний трубопровід 9.

Як приймальний резервуар 3 використовували пластиковий бак з товщиною стінки 7 мм. Загальний об’єм бака – 70 л.

Коефіцієнт шорсткості поверхні для моделі басейну стоку прийнято $n=0,01$, як для фарбованих металевих поверхонь [5]. Інтенсивність модельного “дощу” змінювалася вентиляем 6 в межах від 0,0002 до 0,0005 м/с. Коефіцієнт поверхні басейну стоку приймався $Z_{mid}=1$. Для широких і мілких поверхневих потоків гідравлічний радіус приблизно дорівнює глибині потоку. Середня глибина потоку становила в дослідах від 2 до 4 мм, тому відповідно до формули Павловського показник степеня z приймали 0,620. Відповідно до формули (4) коефіцієнт $m_1=1,058$.

З теоретичної формули (1) випливає, що час поверхневої концентрації дощового стоку для вищезгаданих умов:

$$t_{con} = kq_o^{-z/(1+z)} \cdot (\sqrt{i})^{-1/(1+z)}, \quad (11)$$

де k – коефіцієнт, що знаходиться за формулою:

$$k = m_1 (nR_o)^{1/(1+z)} \left(\frac{2}{Z_{mid}} \right)^{\frac{z}{1+z}}. \quad (12)$$

Для умов експерименту коефіцієнт k був незмінним і дорівнював $k=0,123$.

Під час фізичних експериментів було досліджено динаміку зміни в часі притоку дощових стічних вод з радіального в плані модельного басейну стоку залежно від інтенсивності дощу.

Досліди виконувалися в такій послідовності. Водопровідна вода подавалася з напірного трубопроводу під напором $H \approx 20$ м, який залишався незмінним протягом дослідів. Спостерігаючи за розподільним трубопроводом, визначали початок експериментального “дощу”. У момент часу $t_0=60$ с експериментальний “дощ” припиняли, перекриваючи кульовий кран 5. Поточні значення маси рідини, що надійшла в приймальний резервуар 3, визначалися автоматично в режимі on-line кожні 1/8 с за допомогою електронної ваги Axis BDU-60 з цифровим виходом RS-232. Дані про час і масу притоку модельного “дощового стоку” записувалися у файл даних на персональний комп’ютер. По завершенні кожного дослідів вимірювали температуру води з точністю до 0,1 °С.

Обробляли результати експериментів з використанням електронних таблиць Microsoft Excell. Спочатку обчислювали поточні значення об’єму дощового стоку в приймальному резервуарі 3:

$$W = M / \rho, \quad (13)$$

де M – поточне значення маси притоку, кг; ρ – питома маса води при температурі T , кг/м³.

Максимальна (розрахункова) витрата дощових вод дорівнює об’ємній витраті води, що надходила на установку через подавальний трубопровід 7. Розрахункова витрата Q_r визначалася числовою обробкою результатів другого етапу гідрографа. Оскільки на другому етапі, коли стік у контрольному перерізі формується зі всього басейну стоку, витрата дощового стоку є незмінною в часі, то відповідна залежність об’єму притоку W від часу є лінійною:

$$W_2 = Q_r t - C_2, \quad (14)$$

де C_2 – величина, що залежить від інтенсивності дощу та тривалості першого етапу гідрографа.

Отже, перша похідна від функції $W(t)$ за часом дає значення розрахункової витрати дощового стоку на моделі.

Інтенсивність модельного дощу обчислювали за формулою:

$$q_o = \frac{Q_r}{1000 \cdot F_n}, \text{ м/с}, \quad (15)$$

де F_n – площа моделі радіального в плані басейну стоку; $F_n=1,45$ м².

Розрахунковий час поверхневої концентрації визначали за формулою (11). Аналізували експериментальні криві об'ємів, у результаті чого уточняли значення експериментального часу поверхневої концентрації $(t_r)_{\text{експ}}$. У цей момент часу об'ємна витрата поверхневого потоку, обчислена за апроксимаційною залежністю для першого етапу, повинна дорівнювати розрахунковій витраті Q_r , визначеній раніше.

Для отримання узагальнених гідрографів притоку у безрозмірних змінних обчислювали безрозмірний час X та безрозмірну витрату Q' :

$$X = t / t_r, \quad (16)$$

$$Q' = Q / Q_r. \quad (17)$$

Безрозмірні гідрографи притоку для різних серій, що відповідають різним значенням інтенсивності модельного “дощу”, виводили на один графік для можливості їх порівняння.

На рис. 4 представлено типову криву об'ємів дощового стоку з радіального в плані модельного басейну стоку за незмінної в часі інтенсивності модельного “дощу”, отриману в ході експериментальних досліджень.

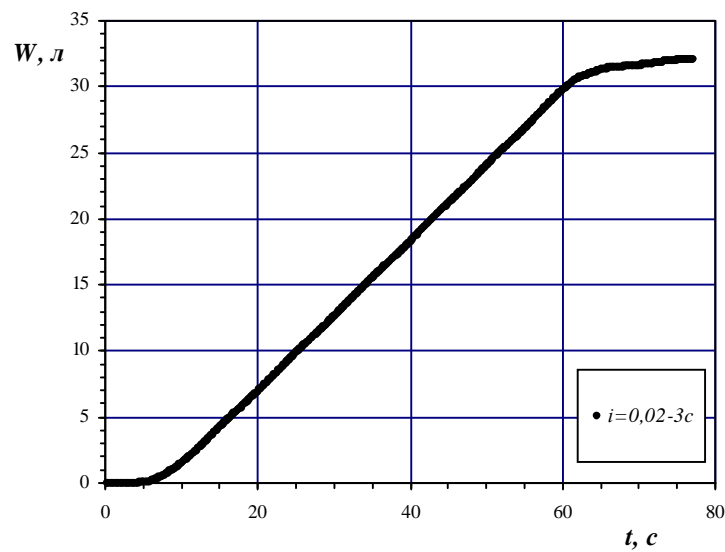


Рис. 4. Повна типова крива об'ємів, отримана експериментальним шляхом

Основний інтерес становив перший етап гідрографа притоку. Типовий графік залежності об'єму притоку від часу для першого етапу ($t < t_r$) та початку другого етапу ($t_r < t < t_d$) для інтенсивності модельного дощу $q_0 = 0,000389$ м/с та похилу $i = 0,02$ представлено на рис. 5.

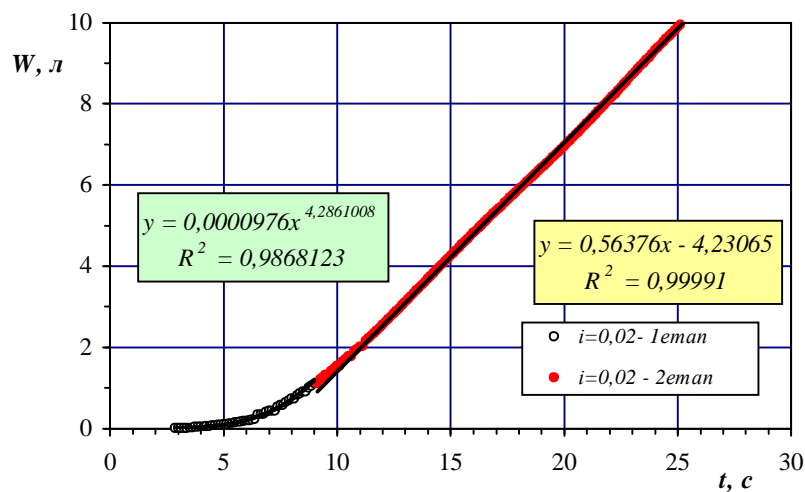


Рис. 5. Експериментальна крива об'ємів з відповідними лініями тренду ($q_0 = 0,000389$ м/с; $i = 0,02$)

Залежність розрахункового та експериментального часу поверхневої концентрації дощового стоку з радіальних в плані басейнів стоку від значення інтенсивності модельного дощу при радіусі басейну стоку $R_o=2,0$ м і похилі $i=0,02$ представлена в таблиці та на рис. 6.

Залежність часу поверхневої концентрації від інтенсивності дощу

Показник	Розмірність	Серія дослідів											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	16
$q_o \times 10^4$	м/с	3,92	4,04	3,89	3,56	3,63	3,77	3,75	3,23	3,39	1,99	3,08	2,52
q_o	л/(с·га)	3924	4041	3890	3559	3634	3772	3752	3234	3393	1993	3076	2524
Q_r	л/с	0,569	0,586	0,564	0,516	0,527	0,547	0,544	0,469	0,492	0,289	0,446	0,366
$(t_r)_{розр}$	с	8,29	8,20	8,32	8,61	8,54	8,42	8,44	8,93	8,77	10,75	9,11	9,82
$(t_r)_{експ}$	с	8,75	8,5	8,75	9,5	9,125	9	9	10	9,75	11,75	10	11,25

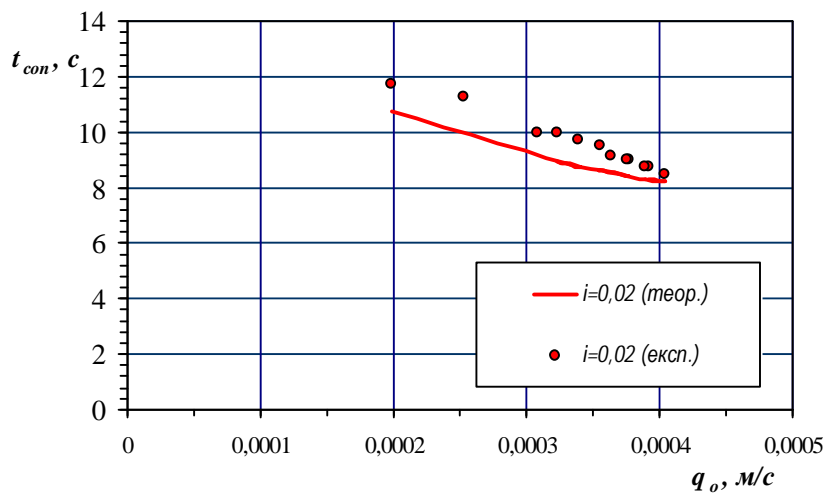


Рис. 6. Залежність розрахункового та експериментального часу концентрації дощового стоку від інтенсивності модельного “дощу” з радіального басейну стоку ($R_o=2,0$ м; $i=0,02$)

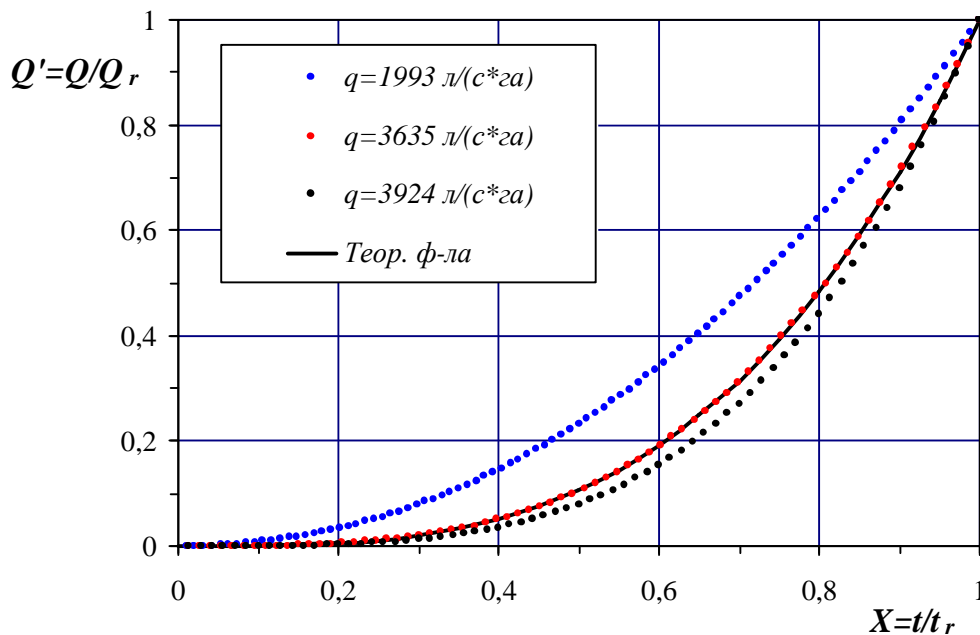


Рис. 7. Безрозмірні гідрографи притоку при різних значеннях інтенсивності модельного “дощу”

Як видно з рис. 6, експериментальний час поверхневої концентрації на 5–15 % перевищує відповідні значення розрахункового часу, визначені за формулою (11). Це можна пояснити тим, що теоретична формула (11) отримана для умов квадратичної області опорів турбулентного режиму руху, а на фізичній моделі верхня частина басейну стоку “працює” в ламінарному режимі та в області гладкостінного опору, що дає дещо завищені значення коефіцієнта гідравлічного тертя, а відтак зумовлює збільшення часу концентрації порівняно з теоретичним.

На рис. 7 представлено гідрографи притоку в безрозмірних координатах при різних значеннях інтенсивності модельного “дощу”. Видно, що при великих значеннях інтенсивності модельного дощу порядку $(4-5) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ експериментальні гідрографи для першого етапу в безрозмірних координатах добре узгоджуються з отриманим теоретичним розв’язком (10). При менших значеннях інтенсивності модельного дощу показник степеня біля безрозмірного часу дещо менший за теоретично прогнозоване значення.

Висновки. У роботі отримано теоретично обґрунтоване узагальнене рівняння (10) для опису першого етапу гідрографа притоку дощових стічних вод для радіальних в плані басейнів стоку з однаковим рівномірним похилом, для дощів постійної в часі інтенсивності за умови наявності по всій довжині басейна стоку квадратичної області гідравлічних опорів.

Виконані експериментальні дослідження на моделі радіального басейна стоку підтвердили достовірність рівняння (10), а також запропонованої в роботі [4] формули (1) для визначення часу поверхневої концентрації дощових стічних вод з радіальних в плані басейнів стоку.

1. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. 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. Жук В.М., Вовк Л.І. Радіальна модель концентрації дощових стічних вод // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник. Вип. 4. – К.: КНУБА, 2005. – С. 84–96. 4. Жук В.М, Рутковська І.З., Вовк Л.І., Омельчак Ю.П. Час поверхневої концентрації дощових вод в басейнах з постійним похилом для дощів постійної в часі інтенсивності // Пожежна безпека. – Львів, 2005. – № 7 – С. 112–118. 5. Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W. Applied Hydrology: McGraw-Hill Science, 1988. – 572 p.