

Математична модель трійника (5) дає змогу також адекватно описати гідравлічні характеристики трійників зі зміною перерізу, а також трійники, що працюють у припливному режимі. Щоправда у припливному режимі змінюються значення усіх коефіцієнтів моделі (табл. 4 і 5).

Показники якості збіжності характеристик не залежать від параметрів трійників: коефіцієнт варіації в усіх випадках не перевищує 0,08 %, а відносна максимальна похибка – 0,4 %. Точність відтворення напірно-витратних характеристик трійника у припливному режимі фактично така сама, як і у витяжному режимі.

#### **Висновки:**

1. Запропонована модель трійника дає змогу адекватно відтворювати гідравлічний опір його рукавів з будь-якими параметрами як у витяжному, так і в припливному режимах.

2. Використання запропонованої моделі трійника дає змогу виконувати гідравлічний розрахунок автономних та індивідуальних систем опалення методами теорії гідравлічних кіл.

1. Меренков А.П., Хасилев В.Я. *Теория гидравлических цепей*. – М.: Наука, 1985. – 278 с.
2. Идельчик И.Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям // Под ред. М.О. Штейнберга – 3-е изд., перераб. и доп.* – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
3. Маліновський А.А., Турковський В.Г., Музичак А.З. *Математична модель вузлів гідравлічних кіл (на прикладі витяжного трійника) // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» “Теплоенергетика. Інженерія докілья. Автоматизація”*. – 2009. – №659 – С.58–63.
4. Маліновський А.А., Турковський В.Г., Музичак А.З. *Дослідження гідравлічних режимів теплових мереж формалізованими методами: Зб. наук. пр. Міжнародної наук.-техн. конф. «Енергоефективність-2004». Додаток до журналу «Холодильна техніка і технологія»*. – С.258–261.
5. Френкель Н.З. *Гидравлика*. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 456 с.
6. Перхач В.С. *Математичні задачі електроенергетики*. – 3-те вид., перероб. і доп. – Львів: Вища шк., 1989. – 464 с.

УДК 628.21

**В.М. Жук, І.І. Матлай**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра гідравліки та сантехніки

## **МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ОБ’ЄМУ ДОЩОВОГО СТОКУ**

© Жук В.М., Матлай І.І., 2010

**Виконано порівняльний аналіз методів розрахунку об’ємів дощових стічних вод. Запропоновано використання деяких положень методу порядкових кривих SCS USDA у вітчизняній інженерній практиці для підвищення точності під час визначення об’єму дощового стоку.**

**The analysis of methods for calculating stormwater runoff is presented. It is proposed to use some conceptions of the USDA SCS Curve Number Method at the Ukrainian engineering practice for more precisely definition of the stormwater runoff.**

**Постановка проблеми.** Сучасний стан розвитку суспільства характеризується високими темпами урбанізації. Відбувається розширення існуючих і створення нових територій промислової та житлової забудови, зміна ландшафтів та існуючих поверхневих покриттів басейнів стоку. Внаслідок цього змінюється гідрологічний баланс місцевості, різко збільшується об’єм і пікова

витрата поверхневого стоку, що може призвести до перевантаження водовідвідних мереж і споруд, підтоплення територій і порушення гідрологічного балансу водою нижче від місця скиду поверхневих стічних вод.

Найважливішим інтегральним параметром, який має бути адекватно визначений під час проектування як накопичувальних, так і регулювальних споруд дощового водовідведення, є розрахунковий об'єм стоку (або шар стоку) певної повторюваності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У вітчизняних та зарубіжних літературних джерелах [1, 4–7] представлено значну кількість методик для визначення об'єму дощового стоку, які дають в результаті значення об'ємів стоку, що дуже відрізняються між собою. В Україні сьогодні діє нормативний документ [1], який регламентує визначення середніх річних об'ємів дощового та талого стоку. Коефіцієнт стоку, який враховує втрати дощової води на початкове затримання, інфільтрацію та випаровування, приймається укрупнено залежно від виду покриття. При цьому не враховуються кліматичні особливості басейну стоку, господарське призначення території, інфільтраційні характеристики ґрунтів та інші вагомні чинники.

**Мета роботи** – виконати аналіз і порівняння існуючих методів розрахунку об'єму дощових стічних вод, запропонувати підходи для точнішого визначення об'єму дощового стоку у вітчизняній інженерній практиці.

**Порівняльний аналіз методів розрахунку об'ємів дощових стічних вод.** Під час випадання дощу не уся його кількість потрапляє у водовідвідну мережу. Значна кількість води витрачається на змочування поверхні басейну стоку та затримується у його нерівностях. Кількість води, яка затримується на поверхні басейну стоку, залежить від пори року, параметрів дощу, типу і характеристик поверхневого покриття басейну стоку. Під час випадання дощів також відбуваються втрати води на випаровування та інфільтрацію в ґрунт. Інфільтрація впливає як на величину стоку, так і на динаміку його перебігу. У міру того, як ґрунт під час випадання дощу насичується водою, все більша кількість води, яка випадає на басейн стоку, перетворюється на поверхневий стік.

Варто чітко розрізняти річний об'єм дощового стоку, об'єм стоку від одного дощу чи за певний заданий інтервал часу.

Середній річний об'єм стоку визначають під час складання водогосподарських балансів і визначають за методикою [1]:

$$W_{ст,р} = \psi_{заг} H_{д,р} F, \quad (1)$$

де  $\psi_{заг}$  – середній зважений за площею загальний коефіцієнт стоку;  $H_{д,р}$  – середня річна висота шару опадів;  $F$  – загальна площа басейну стоку.

Середня річна висота шару опадів у вітчизняній проектній практиці за відсутності місцевих гідрометеорологічних даних приймається за даними [2, 3], або ж за даними дод. 7 [4], які сьогодні помітно застаріли, особливо, враховуючи глобальні кліматичні зміни.

Значення загального коефіцієнта стоку залежить насамперед від типу поверхні за видом забудови чи землекористування, а також від розподілу площі поверхні за видами покриття. За даними чинного сьогодні в Україні нормативного документа [1], значення загального коефіцієнта стоку для дощових стічних вод необхідно приймати: для водонепроникних покриттів в межах 0,6–0,8, для ґрунтових поверхонь – 0,2, для газонів – 0,1, а для талого стоку незалежно від виду покриття – в межах 0,5–0,7. У Росії з 2006 р. діє новий нормативний документ [5], у якому представлено детальніші критерії щодо вибору величини загального коефіцієнта стоку залежно від виду покриття: для покрівель та асфальтобетонних покриттів – 0,6–0,8; для бруківки та щебеневих покриттів – 0,4–0,6; для кварталів міст без дорожніх покриттів – 0,2–0,3; для газонів – 0,1.

Під час проектування споруд систем дощового водовідведення, особливо накопичувального типу або ємнісних очисних споруд, набагато важливіше достовірно визначати розрахунковий об'єм поверхневого стоку від одного дощу. Аналогічно до (1):

$$W_{cm} = \psi_{mid} H_{\delta} F, \quad (2)$$

де  $\psi_{mid}$  – середній зважений за площею коефіцієнт стоку для розрахункового дощу;  $H_{\delta}$  – висота шару опадів для одного розрахункового дощу.

Згідно з рекомендаціями [4, 5] для покрівель та асфальтобетонних покриттів (водонепроникних поверхонь)  $\psi_{заг} = 0,95$ , для брущатих та щебених покриттів – 0,6, для бруківки – 0,45, для щебених покриттів, не оброблених в'язучими матеріалами, – 0,4, для гравійних садово-паркових доріжок – 0,3, для спланованих ґрунтових поверхонь – 0,2, для газонів – 0,1.

Висота шару опадів одного дощу для певного періоду одноразового перевищення визначається залежно від географічного розташування об'єкта за даними гідрометеорологічних спостережень, наприклад, за даними дод. 9 [4] або ж за статистично обґрунтованою формулою:

$$H_{\delta} = k_{\beta} [lg(m_p P)]^{1/\beta} H_{\delta, P_1} / m_p, \quad (3)$$

де  $H_{\delta, P_1}$  – середня річна висота шару дощів за теплий період року;  $m_p$  – умовна середня кількість дощів за теплий сезон року;  $k_{\beta} = f(\beta)$  – коефіцієнт, що залежить від показника степеня  $\beta$ , який приймається залежно від кліматичних особливостей регіону;  $P$  – період одноразового перевищення розрахункової інтенсивності дощу, в роках [4].

Проте чинна в Україні методика не враховує господарське призначення території, тип ґрунтів на території басейну стоку та період повторюваності дощу  $P$ , для якого слід знайти об'єм дощового стоку. У явному вигляді не враховується також висота початкового затримання стоку  $H_o$ , висота шару насичення  $H_{нас}$ , а також співвідношення цих величин з розрахунковою висотою шару опадів певної повторюваності.

Загалом середній коефіцієнт стоку  $\psi_{mid}$  залежить від співвідношення шару опадів, висоти початкового затримання, інфільтраційних та евапораційних характеристик басейну стоку. Існує велика кількість математичних моделей, які описують взаємозв'язок між цими величинами.

Історично першим слід вважати метод Гріна та Емпта [6] (1911 р.), що є спрощеним квазіфізичним методом, який досі вводиться в деякі комп'ютерні моделі розрахунку поверхневого стоку. Він виводиться із закону Дарсі та закону збереження маси за умови наявності ламінарного потоку.

Є багато емпіричних методів для визначення інфільтраційних втрат в басейні стоку. Наприклад, рівняння Річардса (1931 р.) та Шварцендрубера (1969 р.) є фізично-обґрунтованими рівняннями, які розв'язуються для випадку одновимірної інфільтрації, як для випадку однофазної системи (вода), так і для двофазної системи (вода і повітря) [6]. Проте внаслідок значної обчислювальної складності вони широко не застосовуються у проектній практиці.

Запропоновано також багато емпіричних формул, які описують зменшення інтенсивності інфільтрації в часі. Найвідомішими є формули Костякова (1932), Хортон (1939), Філіпа (1957) та Сміта (1972).

Інший клас методів становлять так звані індексні методи, серед яких найвідомішими є метод Ф-індексу та метод порядкових кривих (CN-метод), який сьогодні найчастіше використовується в американській інженерній практиці [7].

Метод порядкових кривих був розроблений Службою охорони ґрунтів Департаменту сільського господарства США (SCS USDA) і є основним методом визначення об'єму поверхневого стоку за нормативним документом TR-55. В основу цього методу покладено таке припущення:

$$\frac{H_{cm}}{H_{надл}} = \frac{H_{надл}}{(H_{надл} + H_{нас})}, \quad (4)$$

де  $H_{cm}$  – висота шару стоку, що потрапляє у водовідвідну мережу,  $H_{cm} = W_{cm}/F$ ;  $H_{надл} = (H_{\delta} - H_o)$  – висота надлишкового шару опадів, визначається як різниця шару опадів та шару початкового затримання  $H_o$ ;  $H_{нас}$  – висота шару насичення, що характеризує максимальні інфільтраційні можливості басейну стоку.

Згідно з великою кількістю проаналізованих експериментальних результатів нормативний документ [7] рекомендує приймати

$$H_o = 0,2H_{нас}, \quad (5)$$

тоді середній коефіцієнт стоку визначається як функція відношення  $H_{нас}/H_o$ :

$$\psi_{mid} = \frac{H_{cm}}{H_o} = \frac{(1 - 0,2H_{нас}/H_o)^2}{1 + 0,8H_{нас}/H_o}. \quad (6)$$

Варто зазначити, що багато досліджень вказує на те, що для умов щільної міської забудови слід приймати  $H_o = 0,1 H_{нас}$  [6].

Висота насичення  $H_{нас}$ , згідно з [7], визначається залежно від безрозмірного параметра  $CN$ , який, своєю чергою, знаходиться за детально розробленими таблицями залежно від виду земельної ділянки за призначенням та від типу ґрунтів, які становлять басейн стоку:

$$H_{нас} = 0,0254 \cdot \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right). \quad (7)$$

Основними чинниками, які впливають на величину параметра  $CN$ , є господарське призначення території басейну стоку та гідрологічна група ґрунтів [7]. Усі ґрунти залежно від фільтраційних характеристик за класифікацією SCS поділяються на чотири гідрологічні групи: А, В, С, D (табл. 1).

У табл. 2 наведено найхарактерніші випадки визначення параметра  $CN$ , які можуть бути використані також в українській інженерній практиці. Знаючи значення  $CN$  і задаючись величиною  $H_o$ , можна розрахувати висоту шару стоку  $H_{cm}$  за формулою (6) або за номограмою (рис. 1).

Таблиця 1

### Критерії для вибору гідрологічної групи ґрунтів [6, 7]

Гідрологічна група ґрунтів згідно з SCS	Опис ґрунтів	Швидкість інфільтрації, мм/год
A	Піщані та гравійні ґрунти значної товщини. Мають високу швидкість інфільтрації навіть у повністю змоченому стані	$\geq 7,6$
B	Добре дреновані ґрунти з діапазоном фракцій від середніх дрібних до середніх великих. Середня або велика товщина шару	3,8 – 7,6
C	ґрунти з підповерхневим шаром, який перешкоджає низхідному руху води або ґрунти з діапазоном фракцій від дрібних до середніх дрібних	1,3 – 3,8
D	ґрунти, що складаються переважно із глин; ґрунти з постійно високим рівнем ґрунтових вод; ґрунти з біляповерхневим розташуванням шару глини або ж малопотужні ґрунти, які знаходяться над майже водонепроникними породами	$< 1,3$

Значення  $CN$  для повністю водонепроникних басейнів стоку становить  $CN=98$  незалежно від типу ґрунтів [7], тобто висота насичення приймається для таких поверхонь рівною  $H_{нас}=5,2$  мм, а висота шару початкового затримання –  $H_o=1,04$  мм. Тоді, наприклад, для умов м. Києва чи м. Львова, для яких розрахункова висота шару опадів з  $P=1/3$  року ( $p_e=95\%$ ) становить  $H_{o,P=1/3}=21$  мм (дод. 9 [4]) коефіцієнт стоку  $\psi_{mid}=0,754$ , що значно менше від єдиного нормативного значення  $\psi_{mid}=0,95$  за вітчизняними методиками. У табл. 3 наведено розрахункові значення середнього коефіцієнта стоку для дощів різної повторюваності для кліматичних умов м. Києва та м. Львова ( $H_{o,P}$  взято за дод. 9 [4]) для трьох типів міської забудови: для територій з 100 % водонепроникних покриттів, для покриттів бізнесових та комерційних районів міста з відсотком водонепроникних покриттів 85 % та для промислових районів міста із відсотком водонепроникних покриттів 72 %.

## Значення номера порядкової кривої за CN-методом SCS USDA [7]

Тип покриття та гідрологічні умови	Відсоток водонепроникних поверхонь	Номер порядкової кривої CN для групи ґрунтів			
		A	B	C	D
Водонепроникні покриття: дахи, паркінги тощо		98	98	98	98
Вулиці та дороги:					
мощені, з дощовими трубопроводами		98	98	98	98
мощені, з відкритими лотками і канавами		83	89	92	93
гравійні		76	85	89	91
ґрунтові		72	82	87	89
Комерційні та бізнесові райони міста	85	89	92	94	95
Промислові райони міста	72	81	88	91	93
Приватні будинки на ділянках з площею:					
500 м <sup>2</sup> і менше	65	77	85	90	92
1000 м <sup>2</sup>	38	61	75	83	87
1350 м <sup>2</sup>	30	57	72	81	86
2000 м <sup>2</sup>	25	54	70	80	85
4000 м <sup>2</sup>	20	51	68	79	84
8000 м <sup>2</sup>	12	46	65	77	82

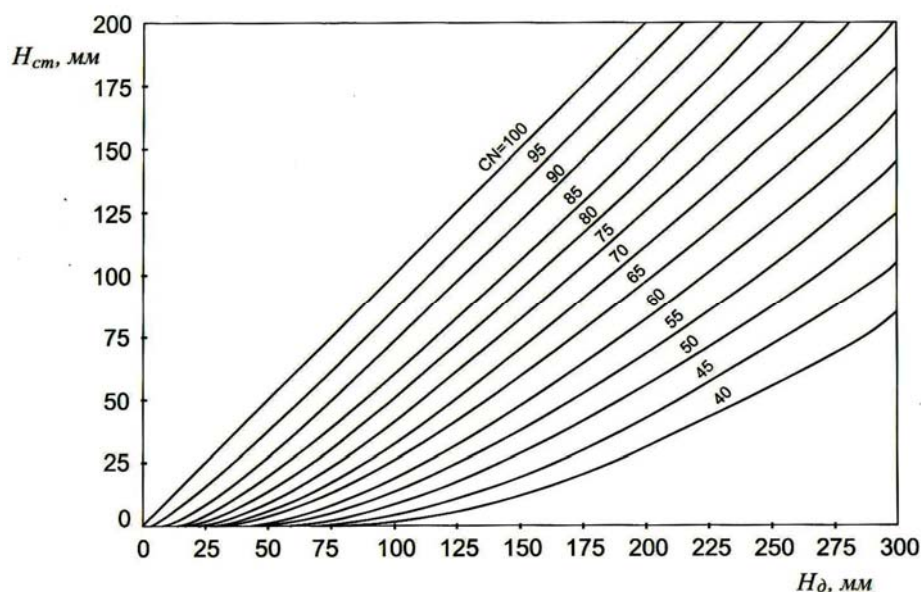


Рис. 1. Номограма для визначення висоти шару стоку за методом порядкових кривих [7]

Як бачимо з табл. 3, метод порядкової кривої та відповідні числові значення шару насичення та шару початкового затримання, які в ньому приймаються, дають значно менші значення коефіцієнта стоку для одного розрахункового дощу, ніж за чинною у нас методикою [4, 5]. Це тим більше не логічно, оскільки в протилежний спосіб співвідносяться середній технічний стан удосконалених покриттів, а відтак і висота шару початкового затримання у вітчизняній та американській інженерній практиці.

Якщо відсоток водонепроникних покриттів відрізняється від середніх даних, наведених в табл. 2, необхідно уточнити значення CN за формулою

$$CN_{comp} = CN + \frac{(98 - CN)}{100 - p_{mid}} \cdot (p - p_{mid}), \quad (8)$$

де  $p$  і  $p_{mid}$  – відповідно фактичний і середній відсоток водонепроникних поверхонь.

Таблиця 3

**Значення коефіцієнта стоку  $\psi_{mid}$  за CN-методом**

Період $P$ , роки		5	2	1	0,5	1/3	1/5	
$H_0$ , мм	для Києва	53	41	33	24	21	17,7	
	для Львова	55	45	35	27	21	16,5	
$\psi_{mid}$	для водонепроникних покриттів	для Києва	0,891	0,862	0,833	0,780	0,754	0,717
		для Львова	0,895	0,874	0,841	0,801	0,754	0,701
	для покриттів комерційних районів	для Києва	0,708	0,644	0,584	0,486	0,442	0,385
		для Львова	0,717	0,668	0,601	0,523	0,442	0,361
	для покриттів промислових районів	для Києва	0,594	0,517	0,447	0,34	0,296	0,24
		для Львова	0,605	0,546	0,466	0,37	0,296	0,218

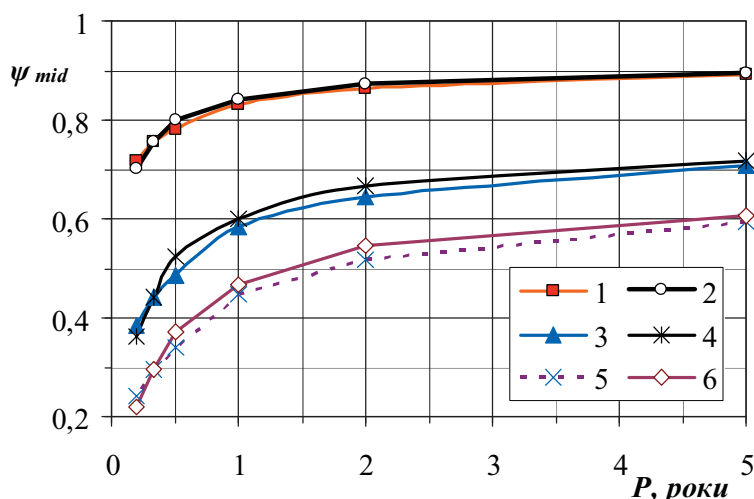


Рис. 2. Залежність середнього коефіцієнта стоку  $\psi_{mid}$  від періоду одноразового перевищення заданої інтенсивності дощу: 1, 2 – для удосконалених водонепроникних поверхонь; 3, 4 – для комерційних та бізнесових районів міста; 5, 6 – для промислових районів міста; 1, 3, 5 – для м. Києва; 2, 4, 6 – для м. Львова

Попри те, що метод порядкових кривих враховує багато чинників, які впливають на дощовий стік, у нього є певні обмеження. Визначення величини об'єму стоку обмежене кривими на діаграмі, які будувалися на основі даних від модельних дощів і не враховують дощів дуже великої інтенсивності, які рідко, але все ж таки випадають у природі. З іншого боку, CN-метод дає надто велику похибку для дощів з висотою шару опадів менше ніж 13 мм та непридатний для басейнів стоку із середнім зваженим значенням  $CN < 40$ .

**Висновок.** Порівняльний аналіз існуючих методів розрахунку об'єму дощового стоку показав, що у результатах вітчизняних і зарубіжних методик існують істотні розбіжності. Показано, що чинний в Україні метод не враховує багато кліматичних та гідрологічних чинників, які істотно впливають на значення коефіцієнта стоку.

У роботі удосконалено вітчизняний метод визначення об'єму дощових стічних вод від одного розрахункового дощу певної повторюваності з урахуванням таких положень методу порядкових кривих SCS USDA: взаємозв'язку між розрахунковою висотою шару опадів, початкового затримання, максимального насичення та висотою шару стоку; експериментальних даних щодо залежності шару максимального насичення та шару початкового затримання залежно від господарського призначення території басейну стоку, відсотка водонепроникних поверхонь та від гідрологічної групи ґрунтів, що становлять басейн стоку.

1. *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. 2. СНиП 2.01.01-82. *Строительная климатология и геофизика.* – М.: Стройиздат, 1983. 3. *Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров: Справ. по климату СССР.* – М., 1967. – Вып. 8. 4. *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. 5. *Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с сельских территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты.* – М.: ФГУП "НИИ ВОДГЕО", 2006 – 57 с. 6. *Mays L.W. Stormwater collection systems design handbook / Mays L.W.* – McGraw-Hill Professional, 2001. – 1008 p. 7. *Urban Hydrology for Small Watersheds. TR-55.* – United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, 1986.– 164 p.

УДК 628.334.6

**І.Ю. Попадюк, В.Г. Павлишин, В.М. Жук**  
Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра гідравліки та сантехніки

## **ВПЛИВ РОЗРАХУНКОВОЇ ТРИВАЛОСТІ ДОЩУ НА РЕГУЛЮВАЛЬНИЙ ОБ'ЄМ РЕЗЕРВУАРІВ ДОЩОВИХ СТІЧНИХ ВОД**

© Попадюк І.Ю., Павлишин В.Г., Жук В.М., 2010

**Представлено результати теоретичного дослідження залежності регулювального об'єму односекційних резервуарів дощових стічних вод проточного типу від тривалості дощу постійної в часі інтенсивності. Отримано залежність максимального коефіцієнта регулювального об'єму від коефіцієнта регулювання витрати та відносної тривалості дощу.**

**The results of theoretical investigation of regulation volume of stormwater storage tanks at the constant rainfall intensity are presented in the paper. The dependence of the maximum storage volume coefficient from the non-dimensional rainfall duration for the different values of the discharge regulation coefficient.**

**Постановка проблеми.** Важливим завданням в галузі водовідведення є збір та використання дощового стоку. Одним із методів регулювання та акумулювання дощового стоку є використання резервуарів дощових стічних вод (РДСВ) різноманітних конструкцій [1–3]. Найважливішим параметром РДСВ є їх регулювальний об'єм, який залежить від графіків притоку та відтоку дощових стічних вод.