

ГІДРОГРАФИ ПРИТОКУ З ВОДОНЕПРОНИКНИХ БАСЕЙНІВ СТОКУ ЗА МЕТОДИКОЮ SWMM ТА ЗА СЕКТОРНИМ МЕТОДОМ

© Жук В. М., Мисак І. В., 2019

Порівняно гідрографи дощового стоку для типових, повністю водонепроникних квадратних у плані басейнів стоку, отриманих за методом нелінійного резервуара та за секторним методом. Обґрунтовано, що перевагами секторного методу є врахування зміни по площі басейна стоку глибини та швидкості течії поверхневого потоку. Встановлено, що гідрографи притоку за секторним методом порівняно з аналогічними гідрографами за методом нелінійного резервуара характеризуються загалом значно інтенсивнішим збільшенням витрати притоку на першому етапі гідрографа та зменшенням витрати після припинення дощу. Максимальні розрахункові витрати гідрографів дощового стоку за секторним методом для повністю водонепроникних квадратних у плані басейнів стоку за кліматичних умов м. Львова за періоду одноразового перевищення дощу $P=1$ рік у 1,29 разу перевищують відповідні витрати, отримані з використанням методом нелінійного резервуара. Отримано автотельність узагальнених безрозмірних гідрографів стоку за розмірами суббасейнів, за поздовжнім похилом території та коефіцієнтом шорсткості покриття.

Ключові слова: гідрограф дощового стоку, поверхневий стік, водонепроникний суббасейн, метод нелінійного резервуара, секторний метод.

V. M. Zhuk, I. V. Mysak

Lviv Polytechnic National University
Department of Hydraulics and Sanitary Engineering

HYDROGRAPHS FROM THE IMPERVIOUS CATCHMENTS USING THE SWMM METHOD AND THE SECTOR METHOD

© Zhuk V. M., Mysak I. V., 2019

The theoretical analysis and comparison of the nonlinear reservoir method and the sector method of calculating the stormwater runoff hydrographs from the urbanized catchments are carried out in the paper. The key advantages of the sector method are in taking into account the variable depth and flow velocity of the surface flow. A comparison of stormwater surface runoff hydrographs for completely impervious square drainage subcatchments, obtained by the nonlinear reservoir method and by the sector method, is performed. The accuracy of the numerical implementation of the sector method was controlled by the deviation of the calculated volume of the stormwater runoff comparing to the corresponding theoretical value. The relative difference between the two indicated volumes for the entire investigated range of values of the input parameters did not exceed 0.002 %. It was established that the stormwater runoff hydrographs, obtained by the sector method, comparing with similar hydrographs for the nonlinear reservoir method are generally characterized by considerably more intensive growing of the flow rate at the first stage of the hydrograph and the same quick reduction of the discharge after the rainfall event. The maximum calculation flow rates of the stormwater surface runoff hydrographs using the sector method for completely impervious square drainage subcatchments for the climatic conditions of the city of Lviv at the return period $P = 1$ year are 1.29 times higher than the

corresponding volume discharges obtained using the nonlinear reservoir method. The invariance of generalized non-dimensional stormwater runoff hydrographs, modelled by the nonlinear reservoir method and by the sector method, was obtained for the following input parameters: absolute dimensions of square subcatchments, longitudinal slope of the territory and the roughness coefficient of the subcatchment's surface.

Key words: stormwater hydrograph, surface runoff, impervious subcatchment, nonlinear reservoir method, sector method.

Вступ. Зміна кліматичних характеристик, зумовлена глобальним потеплінням, разом з інтенсивною урбанізацією територій зумовлюють підвищення вимог до надійності систем дощового водовідведення. Формування поверхневого стоку з урбанізованих територій є складним багатофакторним завданням. Окрім кліматичних параметрів, які характеризують статистику випадання дощів великої інтенсивності на конкретній місцевості, на гідрографи дощового стоку впливають також топогеодезичні параметри майданчика (конфігурація, розміри в плані, висотна схема, поздовжні та поперечні похили поверхні тощо), гідравлічні та гідрологічні характеристики урбанізованого басейна стоку (коефіцієнт шорсткості покриттів, коефіцієнт стоку та ін.), а також локальні особливості схем відведення поверхневого стоку як у вигляді відкритих потоків у кюветах, лотках і каналах, так і закритою підземною водовідвідною мережею.

Огляд наукових джерел і публікацій. Складність та взаємопов'язаність гідравлічних явищ, які виникають при формуванні дощового стоку, а також унікальний характер сукупності параметрів для кожного окремо взятого басейна стоку зумовлюють необхідність використання для вирішення цих завдань комп'ютерних моделей. Сьогодні у світі використовують близько двох десятків програмних комплексів для моделювання кількісних та якісних характеристик дощового стоку [1]. Найчастіше сьогодні використовують програму SWMM, яку розробила Агенція з охорони довкілля США (US EPA), а також її спеціалізовані різновиди [2]. SWMM вперше розроблена у 1969–1971 рр., і з того часу багаторазово оновлена. Найновіша версія SWMM 5/5.1.011 має повністю відкритий вихідний код, який можна завантажити з веб-сайту EPA.

Першим етапом комп'ютерного гідравлічного розрахунку системи дощового водовідведення є побудова вихідних гідрографів стоку з поверхні окремих ділянок території (суббасейнів). За найдетальнішого моделювання кожний суббасейн – це частина урбанізованого басейна стоку, яку обслуговує один дощоприймач. Для розрахунку гідрографів поверхневого стоку з суббасейнів використовують близько десятка кардинально різних за підходами методів: від емпіричних методів раціональної формули і одиничних гідрографів [1] та квазіфізичного методу нелінійного резервуара [2, 5] до гідравлічно обґрунтованих методів кінематичної та дифузійної хвиль [5] і методу нечіткої логіки [4].

У програмному комплексі SWMM гідрографи стоку із суббасейнів визначають за методом нелінійного резервуара. Суть методу полягає в тому, що суббасейн подають у вигляді рівновеликого за площею прямокутника з еквівалентною шириною, яку визначають як частку площі суббасейна та довжини шляху поверхневої концентрації. Витрату поверхневих стічних вод за методом нелінійного резервуара визначають за формулою Шезі для рівномірного руху у відкритому каналі, виходячи з припущення щодо наявності у всіх точках суббасейна однакової глибини та, відповідно, однакової швидкості течії [2]. Останні припущення виглядають найбільш проблемними з фізичного погляду, оскільки очевидним є фактичне збільшення в напрямку течії витрати, глибини та середньої швидкості поверхневого потоку. Для удосконалення гідравлічного методу розрахунку поверхневого стоку з урбанізованих суббасейнів у працях [3, 6] було обґрунтовано модифікований метод кінематичної хвилі, а в роботах [7, 8] представлено та детально розроблено секторний метод розрахунку гідрографів стоку, що дає змогу враховувати реальну конфігурацію суббасейна, а також зміну гідравлічних параметрів поверхневого потоку у напрямку до водоприймального пристрою.

Мета дослідження – порівняльний аналіз розрахункових гідрографів стоку, отриманих для повністю водонепроникних, квадратних у плані суббасейнів стоку за допомогою методу неліній-

ного резервуара та секторного методу. Задачі дослідження: проаналізувати припущення та фізичні моделі поверхневих потоків на урбанізованих територіях, що закладені в методі нелінійного резервуара та секторному методі; виконати теоретичне зіставлення основних інтегральних параметрів поверхневого стоку за вказаними методами; реалізувати серію чисельних експериментів для порівняння гідрографів притоку з однорідних водонепроникних суббасейнів стоку за методом нелінійного резервуара та за секторним методом.

Метод нелінійного резервуара. Метод нелінійного резервуара, призначений для моделювання гідрографів дощового стоку з малих однорідних урбанізованих басейнів стоку, виходить з припущень щодо рівності в усіх точках суббасейна основних гідравлічних параметрів поверхневого потоку, а саме – глибин та середньої швидкості [2, 5]. Витрату поверхневого потоку у контрольному перерізі в методі нелінійного резервуара визначають за формулою Шезі для рівномірного потоку у відкритому руслі прямокутного поперечного перерізу:

$$Q_{con} = \frac{B_{eq} R_h^{5/3} i_{con}^{1/2}}{n_1}, \quad (1)$$

де B_{eq} – еквівалентна ширина суббасейна, яку визначають як частку його площі в плані F та радіуса концентрації поверхневого стоку R_{con} ; R_h – гідравлічний радіус поверхневого потоку, який для мілких широких потоків чисельно дорівнює глибині потоку h ; i_{con} – поздовжній похил території суббасейна в напрямку до дощоприймача; n_1 – коефіцієнт шорсткості поверхні.

Диференціальне рівняння матеріального балансу об'єму поверхневого стоку $W(t)$:

$$\frac{dW}{dt} = Fq_{ex} - Q_{con}, \quad (2)$$

де F – площа суббасейна в плані; q_{ex} – інтенсивність за шаром надлишку опадів, яку визначають як різницю інтенсивності випадання дощу та інтенсивностей інфільтрації та випаровування.

Отже, зміна в часі висоти шару поверхневого стоку $h(t)$ описується нелінійним диференціальним рівнянням

$$\frac{dh}{dt} = q_{ex} - \frac{B_{eq} i_{con}^{1/2}}{Fn_1} h^{5/3}. \quad (3)$$

Гідрограф поверхневого стоку з площі суббасейна за методом нелінійного резервуара описується функцією

$$Q_{con}(t) = \frac{B_{eq} i_{con}^{1/2} h(t)^{5/3}}{n_1}, \quad (4)$$

де $h(t)$ визначають за диференціальним рівнянням (3).

Важливою особливістю методу нелінійного резервуара є відсутність у ньому блоку, що визначав би критичні значення тривалості та інтенсивності випадання дощу. Практична реалізація методу в середовищі SWMM полягає у послідовному моделюванні гідрографів стоку від розрахункових дощів різної тривалості та, відповідно, інтенсивності, з подальшим зіставленням отриманих гідрографів і емпіричному визначенні з певним наближенням, зумовленим величиною кроку, параметрів критичного дощу, що зумовлює максимальне значення витрати стоку у контрольному перерізі системи дощового водовідведення.

Секторний метод. У роботах [7, 8] розроблено новий гідравлічно обґрунтований секторний метод розрахунку гідрографів поверхневого стоку з урбанізованих суббасейнів довільної конфігурації в плані. Секторний метод за своєю суттю є модифікацією методу кінематичної хвилі. За секторним методом можна враховувати зміну за територією суббасейна значень глибин та середніх швидкостей поверхневого стоку.

Згідно з секторним методом час поверхневої концентрації з суббасейна довільної в плані конфігурації визначають за теоретичною формулою для радіального басейна стоку [3, 7]:

$$t_{con} = \left[\frac{1,41(R_{con} n_1)^{0,6}}{(1200^n \psi_{mid} q_{20,P})^{0,4} t_{con}^{0,3}} \right]^{\frac{1}{1-0,4n}}, \quad (5)$$

де R_{con} – радіус концентрації стоку, м; ψ_{mid} – коефіцієнт стоку; $q_{20,P}$ – інтенсивність випадання дощу тривалістю 20 хв для заданого періоду одноразового перевищення P ; n – показник степеня у рівнянні розрахункової інтенсивності дощу

$$q_o = A/t_o^n, \quad (6)$$

де q_o – інтенсивність випадання розрахункового дощу тривалістю t_o ;

$$A = q_{20} 20^n \left(1 + \frac{\lg P}{\lg m_r} \right)^\gamma, \quad (7)$$

де q_{20} – інтенсивність випадання дощу тривалістю 20 хв для періоду одноразового перевищення $P=1$ рік; m_r – середня кількість дощів за рік; γ – показник степеня.

Основна ідея секторного методу полягає в тому, що суббасейн довільної конфігурації розбивають на велику кількість секторів з вершиною у місці розташування дощоприймача. Кожен з таких секторів з високим ступенем наближення можна розглядати як радіальний у плані суббасейн стоку. Для кожного сектора за методикою, яку детально описано в [7], генерується свій елементарний гідрограф стоку, а потім за принципом суперпозиції визначають загальний сумарний гідрограф зі всього суббасейна. Максимальна витрата гідрографа стоку, розрахованого за секторним методом, дорівнює:

$$Q_r = (\psi_{mid} q_{20,P})^{\frac{1}{1-0,4n}} \left(\frac{1200 \cdot i_{con}^{0,3}}{1,41 n_1^{0,6} R_{con}^{0,6}} \right)^{\frac{n}{1-0,4n}} \cdot F. \quad (8)$$

Теоретичне зіставлення та чисельне моделювання гідрографів стоку. Важливою задачею, що визначає коректність зіставлення різних методів розрахунку гідрографів дощового стоку, є приведення порівнюваних методів до однакових розрахункових умов. У цьому дослідженні для виключення впливів прийнятих інфільтраційних моделей на гідрографи стоку розглянуто тільки гідравлічну частину задачі, тобто граничний випадок повністю водонепроникних суббасейнів з нульовими значеннями інтенсивності інфільтрації та випаровування, а також з відсутністю шару початкового затримання ($h_o=0$). Ці умови відповідають значенню коефіцієнта стоку $\psi_{mid} = 1$, тобто рівності об'єму дощових опадів та загального об'єму поверхневого стоку.

Для забезпечення коректності порівняння гідрографів за обома методами приймали однакову тривалість, а відтак інтенсивність випадання розрахункових дощів. Тривалість розрахункового дощу приймали згідно з методом граничних інтенсивностей як таку, що дорівнює часу поверхневої концентрації для секторного методу, визначеному за формулою (5). Інтенсивність випадання розрахункового дощу визначали за рівнянням (6) з використанням однакових значень кліматично-проектних параметрів q_{20} , n та P . Чисельну реалізацію методу нелінійного резервуара за кожним розрахунковим варіантом виконували для дощів такої самої тривалості та інтенсивності, що й за секторним методом.

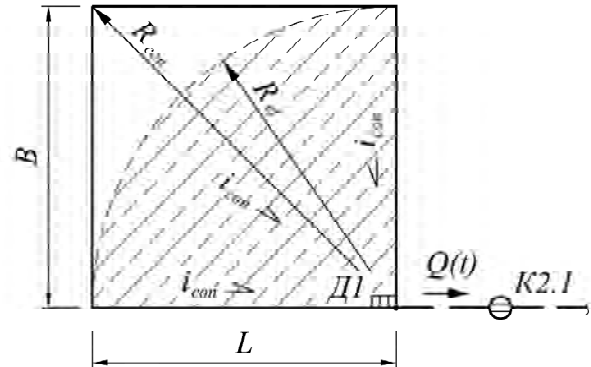
Як показано в працях [7, 8], серед усіх прямокутних у плані суббасейнів стоку фіксованої площі гідрограф з максимальною піковою витратою відповідає суббасейну квадратної форми. Нижче наведено моделювання гідрографів дощового стоку з поверхні плоских, однорідних, повністю водонепроникних суббасейнів стоку квадратної конфігурації в плані ($L/B=1$), які виникають у результаті випадання розрахункових дощів за методом граничних інтенсивностей. Розрахункову схему суббасейна стоку зображено на рис. 1.

За основний контрольний параметр за чисельної реалізації секторного методу прийнято рівність об'ємів розрахункового дощу та сумарний об'єм поверхневого стоку, що визначався чисельним інтегруванням в часі отриманого сумарного гідрографа з території суббасейна. Відносне розходження

двох вказаних об'ємів для всього дослідженого діапазону значень вхідних параметрів не перевищувало значення 0,002 % і було зумовлено виключно похибками заокруглення результатів обчислень.

Порівняння гідрографів стоку, отриманих за секторним методом та за методом лінійного резервуара за різних значень поздовжнього похилу поверхні повністю водонепроникного суббасейна з розмірами в плані 50×50 м для кліматичних умов м. Львова, наведено на рис. 2.

Рис. 1. Схема формування поверхневого стоку з типового квадратного у плані суббасейна



Встановлено, що на перших етапах гідрографів стоку (при $t < t_r$) гідрографи, отримані за секторним методом, порівняно з гідрографами за методом нелінійного резервуара, характеризуються повільнішим розгоном на ранніх фазах першого етапу та інтенсивнішим зростанням витрати надалі. Максимальна витрата стоку за секторним методом в усіх розглянутих випадках значно перевищує відповідну витрату, отриману з використанням методу нелінійного резервуара. Спадні ділянки гідрографів (при $t > t_r$), отримані за секторним методом, є більш пологими на початках цього етапу з подальшим різким спадом витрати до нульових значень. Для гідрографів, отриманих за методом нелінійного резервуара, існує зворотна тенденція: різке, скачкоподібне зменшення витрати одразу після завершення дощу із плавним асимптотичним виходом витрати на нульові значення.

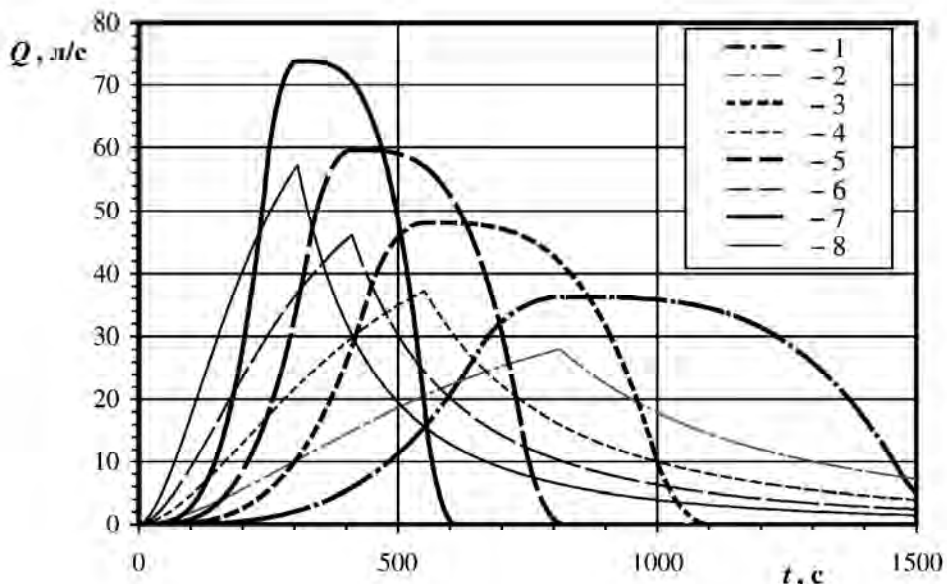


Рис. 2. Гідрографи поверхневого стоку з типового однорідного повністю водонепроникного суббасейна за різних значень поздовжнього похилу поверхні i_0 : 1, 2 – 0,002; 3, 4 – 0,005; 5, 6 – 0,01; 7, 8 – 0,02; 1, 3, 5, 7 – за секторним методом; 2, 4, 6, 8 – за методом нелінійного резервуара ($q_{20}=109$ л/(с×га); $P=1$ рік; $n=0,73$; $L=B=50$ м; $n_1=0,015$; $\psi_{mid}=1$)

Порівняння максимальних витрат дощового стоку для тестового суббасейна для вказаних умов наведено на рис. 3. Отримано пропорційність максимальних витрат за методом нелінійного резервуара $(Q_r)_{N-L}$ та за секторним методом $(Q_r)_S$, причому для умов цього дослідження отримано постійне співвідношення цих витрат: $(Q_r)_{N-L}/(Q_r)_S = 0,774$.

Порівняно узагальнені безрозмірні гідрографи стоку, отримані за двома проаналізованими в статті методами. За масштаб часу приймали час концентрації $t_r = t_{con}$, визначений за формулою (5), а за масштаб витрати – максимальну розрахункову витрату секторного методу $(Q_r)_S$. Для обох методів отримано автомодельність безрозмірних гідрографів за такими вхідними параметрами, як абсолютні розміри квадратного суббасейна в плані, поздовжній похил території та коефіцієнт шорсткості покриття суббасейна.

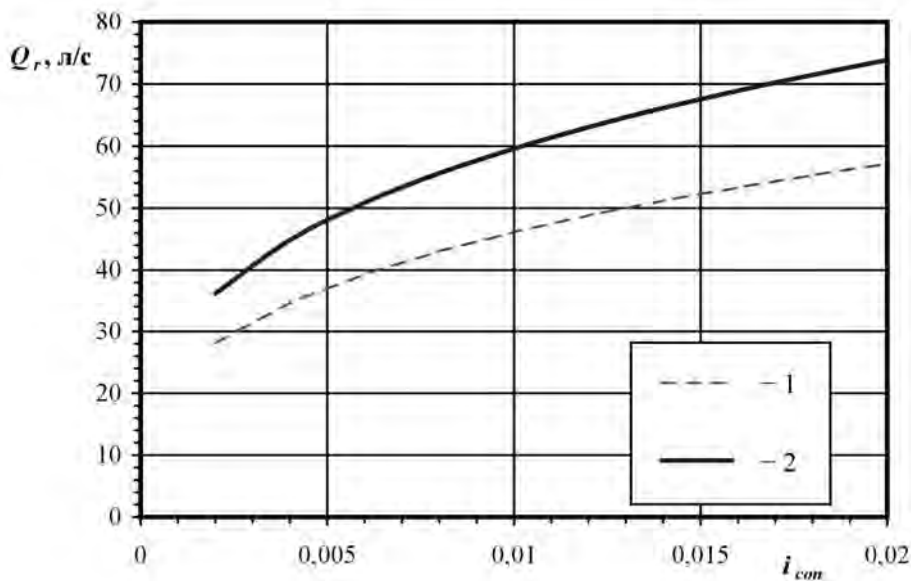


Рис. 3. Максимальні витрати дощового стоку з однорідного повністю водонепроникного суббасейна: 1 – за методом нелінійного резервуара; 2 – за секторним методом ($q_{20}=109$ л/(с×га); $P=1$ рік; $n=0,73$; $L=B=50$ м; $n_1=0,015$; $\psi_{mid}=1$)

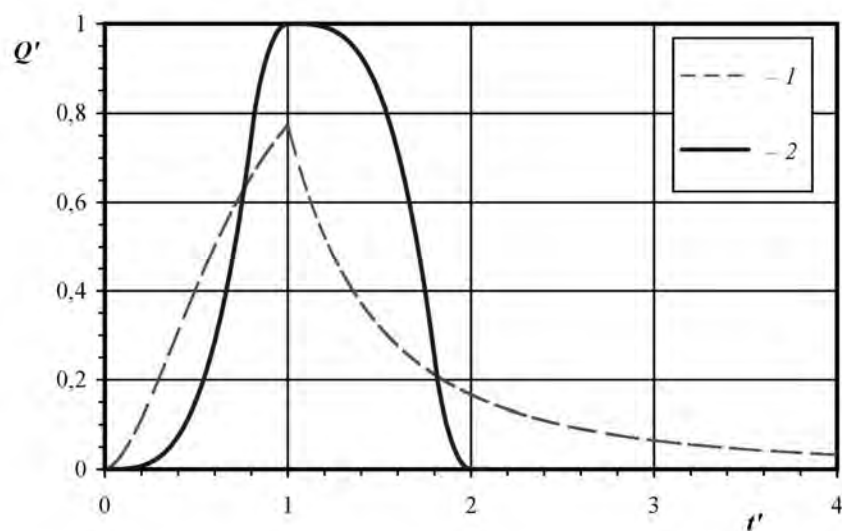


Рис. 4. Узагальнені безрозмірні гідрографи поверхневого стоку з квадратних у плані однорідних водонепроникних басейнів стоку: 1 – за методом нелінійного резервуара; 2 – за секторним методом

Висновки.

1. Виконано теоретичний аналіз та зіставлення методу нелінійного резервуара і секторного методу розрахунку гідрографів дощового стоку з урбанізованих басейнів стоку. Перевагами секторного методу є врахування зміни за площею басейна стоку глибини та швидкості течії поверхневого потоку.

2. Порівняно гідрографи стоку для типових, повністю водонепроникних квадратних у плані басейнів стоку, отриманих за методом нелінійного резервуара та за секторним методом. Встановлено, що гідрографи притоку за секторним методом порівняно з аналогічними гідрографами за методом нелінійного резервуара характеризуються загалом значно інтенсивнішим збільшенням витрати притоку на першому етапі гідрографа та зменшенням витрати після припинення дощу.

3. Максимальні розрахункові витрати гідрографів дощового стоку за секторним методом для повністю водонепроникних квадратних у плані басейнів стоку за кліматичних умов м. Львова при періоді одноразового перевищення дощу $P=1$ рік в 1,29 рази перевищують відповідні витрати, отримані з використанням методом нелінійного резервуара.

4. Отримано автотельність узагальнених безрозмірних гідрографів стоку за методом нелінійного резервуара та за секторним методом, за такими вхідними параметрами: абсолютні розміри квадратних суббасейнів у плані, поздовжній похил території та коефіцієнт шорсткості покриття суббасейна.

1. Borah D. K. *Hydrologic procedures of storm event watershed models: a comprehensive review and comparison* // *Hydrological Processes*. – 2011. – Vol. 25, p. 3472–3489. 2. James W., Rossman L. *Water systems models. User's guide to SWMM 5, 13th ed.* // *CHI Press Publication, Ontario, Canada*. – 2010. – 905 p. 3. Ткачук С. Г., Жук В. М. *Регулювання дощового стоку в системах водовідведення: монографія*. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 216 с. 4. Wang K. H., Altunkaynak A. *Comparative case study of rainfall-runoff modeling between SWMM and fuzzy logic approach* // *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012. – Vol. 17, No. 2. – P. 283–291. 5. Xiong Y., Melching C. S. *Comparison of kinematic-wave and nonlinear reservoir routing of urban watershed runoff* // *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*. – 2005. – Vol. 10, No. 1. – P. 39–49. 6. 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. 7. Жук В. М., Матлай І. І. *Гідрографи притоку дощових стічних вод з прямокутних в плані урбанізованих басейнів стоку для дощів постійної в часі інтенсивності* // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник*. Вип. 19. – К.: КНУБА, 2012. – С. 31–38. 8. Жук В. М. *Влияние конфигурации малых урбанизированных бассейнов стока на гидрографы притока дождевых сточных вод.* // *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. – 2015. – Vol. 17, No 6. – P. 111–117.

References

1. Borah D. K. (2011), "Hydrologic procedures of storm event watershed models: a comprehensive review and comparison", *Hydrological Processes*, Vol. 25, p. 3472–3489. 2. James W. and Rossman L. (2010), *Water systems models. User's guide to SWMM 5, 13th ed.*, *CHI Press Publication, Ontario, Canada*, 905 p. 3. Tkachuk S. G. and Zhuk V. M. (2012), *Reguljuvannja doshchovogho stoku v systemakh vodovidvedennja: monografija*. [Stormwater management in sewerage systems: monograph], Lviv: Vydavnyctvo Lvivskoji politekhnyky, 216 p. [in Ukrainian]. 4. Wang K. H. and Altunkaynak A. (2012), "Comparative case study of rainfall-runoff modeling between SWMM and fuzzy logic approach", *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 17, No. 2, p. 283–291. 5. Xiong Y. and Melching C. S. (2005), "Comparison of kinematic-wave and nonlinear reservoir routing of urban watershed runoff", *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 10, No. 1, p. 39–49. 6. Zhuk V. M. (2007), "Hidrohrafy prytoku

dlia doshchiv postiinoi v chasi intensyvnosti ta liniinykh baseiniv stoku” [Runoff hydrographs for the rainfalls of constant intensity and linear catchments], *Visnyk of Lviv Polytechnic National University “Theory and Practice of Construction”, N 602, p. 61–65 [in Ukrainian].* 7. Zhuk V. M. and Matlay I. I. (2012), “*Hidrohrafy prytoku doshchovykh stichnykh vod z priamokutnykh v plani urbanizovanykh baseiniv stoku dlia doshchiv postiinoi v chasi intensyvnosti*” [Stormwater hydrographs from rectangular urbanized catchments for the rainfalls with constant intensity in time], *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulics, Vol. 19, Kyiv: KNUBA, p. 31–38 [in Ukrainian].* 8. Zhuk V. M. (2015), “*Vlyanye konfiguratsii malykh urbanizovannykh basseinov stoka na gidrografy pritoka dozhdovykh stochnykh vod*” [Influence of the configuration of small urbanized catchments on the stormwater hydrographs], *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol. 17, No. 6, p. 111–117 [in Russian].*