

## АНОТАЦІЯ

*Мисак І.В.* Гідравлічне моделювання мереж дощового водовідведення за наявності регулювання стоку. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія ( 19 – Архітектура та будівництво). – Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2021.

Проблема затоплення урбанізованих територій в Україні внаслідок збільшення об’ємів та витрат поверхневого стоку підсилюється зростаючими трендами урбанізації, кліматичними змінами та проблемним технічним станом водовідвідних мереж. Аналіз вказує на те, що актуальність цієї проблеми зростатиме упродовж наступних десятиліть. Це спонукає наукову та інженерну спільноту до розробки стратегій і планів управління дощовим стоком, а також до широкого впровадження в українську інженерну практику систем регулювання поверхневим стоком, які мають бути науково обґрунтовані та пристосовані до місцевих кліматичних, містобудівних та економічних умов.

У роботі вирішено важливе науково-практичне завдання – розроблення нових і удосконалення відомих методів моделювання дощового стоку на забудованих територіях з урахуванням регулювального впливу окремих елементів водовідвідних споруд. Результати роботи мають значення для забезпечення комплексної надійності систем водовідведення населених пунктів України в умовах постійного наростання тенденцій урбанізаційних процесів та з урахуванням глобальних змін кліматичних параметрів.

Визначальним фактором для розроблення та імплементації адекватних практичних планів з управління поверхневим стоком є його науково-обґрунтоване моделювання, яке здійснюється відповідно до кліматичних характеристик і параметрів басейна стоку з урахуванням діапазонів їх прогнозованої зміни в часі.

Моделювання поведінки поверхневого стоку з урбанізованих територій є складною багатофакторною проблемою. Обґрунтовано, що достовірні

результати моделювання складних дощових водовідвідних мереж з наявністю регулювальних споруд можна отримати лише з застосуванням багатofакторних чисельних моделей, що реалізуються у відповідних комп'ютерних програмах.

Аналіз вказує на те, що найбільш використовуваним на сьогодні у світі інструментом для комп'ютерного моделювання роботи систем дощового водовідведення на урбанізованих територіях є програмний комплекс SWMM. Разом з тим, SWMM використовує ряд спрощених підходів до моделювання гідрологічно-гидравлічних характеристик систем дощового водовідведення. Зокрема, для моделювання первинних гідрографів стоку з окремих підбасейнів стоку використовується наближений метод нелінійного резервуару, в якому підбасейн довільної форми в плані умовно розглядається як рівновеликий за площею прямокутник з довжиною, рівною радіусу концентрації поверхневого потоку, а похил підбасейна у напрямку до дощоприймача припускається однаковим у всіх його точках.

При плануванні експериментальних досліджень гідрографів стоку обґрунтовано систему масштабів досліджуваних фізичних величин. При масштабних коефіцієнтах глибини потоку  $C_H = 1$ , середньої швидкості потоку  $C_V = 1$ , часу  $C_t = C_L$ , інтенсивності дощу  $C_q = 1/C_L$ , площі дощоприймального отвору  $C_\omega = C_L$ , вдається досягти на фізичній моделі однакового масштабу об'ємної витрати дощу, поверхневого потоку та витрати крізь дощоприймач  $C_Q = C_L$ ; окрім того одночасно забезпечується подібність модельного та натурального явищ як за критерієм Фруда, так і за критерієм Рейнольдса.

Запроектовано та змонтовано дослідну установку, на якій можна експериментально моделювати гідрографи дощового стоку з типових квадратних у плані підбасейнів стоку у діапазоні значень геометричного масштабу  $C_L = 10 - 30$ , що відповідає натурним підбасейнам з розмірами від  $15 \times 15$  м до  $45 \times 45$  м. Конструкція експериментальної установки дозволяє моделювати гідрографи стоку з плоских підбасейнів для різних висотних схем зі значеннями поздовжнього та поперечного похилів від 0,005 до 0,02. Обґрунтовані в роботі методи експериментальних досліджень та обробки експериментальних даних забезпечують відносну похибку визначення

максимальної витрати стоку не більшою за 0,48 %.

Обґрунтовано та розроблено удосконалений тривимірний секторний метод, що дозволяє враховувати фактичну конфігурацію та висотну схему урбанізованого підбасейна стоку за рахунок автоматичного визначення похилів для кожного сектора на підставі обробки даних щодо трьох геодезичних координат усіх характерних точок підбасейна. Перевагою тривимірного секторного методу над простим секторним методом є врахування змінного похилу поверхні до дощоприймача для підбасейнів з плоскою топологією.

Врахування у 3D секторному методі змінного похилу плоскої урбанізованої поверхні, залежно від розташування сектора, зумовлює відчутні зміни в гідрографах стоку: скорочення часу поверхневої концентрації на 13,7 % та збільшення пікової витрати на 11,3 % порівняно з результатами за простим секторним методом. Порівняно з методом нелінійного резервуару 3D секторний метод дає максимальну секундну витрату дощового стоку, більшу на 43,8 %.

Розроблено математичну модель регулювального впливу на гідрографи дощового стоку ємнісних споруд систем дощового водовідведення – від звичайних каналізаційних колодязів до спеціальних регулювальних резервуарів дощових стічних вод (РДСВ). Розроблено відповідну чисельну схему та алгоритм комп'ютерного розрахунку, що дозволяють розв'язувати пряму та зворотну задачі гідравлічного моделювання: визначити потрібний регулювальний об'єм ємнісних споруд при заданих граничних параметрах гідрографів стоку у заданих контрольних перерізах або ж визначити параметри гідрографа стоку при заданих характеристиках вищерозташованих регулювальних споруд.

Розрахункові значення коефіцієнтів регулювального об'єму РДСВ, отримані за запропонованим у роботі методом, у 7,1 – 12,9 раз менші за відповідні значення за методом СПБГАСУ, що пояснюється як різницею безрозмірних гідрографів притоку, так і врахуванням у запропонованому методі регулювальної здатності розташованої вище водовідвідної мережі, яка кількісно

характеризується коефіцієнтом регулювання максимальної витрати або ж коефіцієнтом заповнення вільної ємкості мережі  $\beta$ .

Отримано експериментальну залежність коефіцієнта стоку  $\psi$  від висоти шару опадів  $h_0$ , що з високим ступенем точності може бути описана лінією тренду за логістичною моделлю. При значенні  $h_0 \approx 7$  мм експериментальний коефіцієнт стоку  $\psi \approx 0,95$ , що відповідає значенню, яке рекомендується в чинних в Україні методиках розрахунку параметрів дощового стоку з повністю водонепроникних урбанізованих басейнів стоку. За збільшення  $h_0$  коефіцієнт стоку поступово зростає, асимптотично наближаючись до значення  $\psi_{\max} = 0,988$ .

Удосконалено методику експериментального визначення максимальної витрати дощового стоку, що полягає у апроксимаційній обробці діапазону експериментальних точок на кривій об'єму в околі точки максимуму, що відповідає тривалості модельного дощу  $t_0$ ; відносна різниця між розрахунковими значеннями максимальної витрати, отриманими з лінійних та квадратичних апроксимацій, не перевищує 0,18 %.

Експериментальні гідрографи дощового стоку, отримані на фізичній моделі, суттєво відрізняються від теоретичних гідрографів, визначених за секторним і тривимірним секторним методом, а також методом нелінійного резервуару. Причина такої відмінності полягає в припущенні про вільний витік рідини з території підбасейну, що приймається у всіх вищезгаданих теоретичних моделях.

Отримані експериментальні гідрографи притоку в дощоприймальний колодязь складаються з трьох характерних етапів. Перший етап відповідає процесу концентрування поверхневого стоку з території підбасейна та вільному витіканню крізь дощоприймальний отвір. На цьому етапі отримано аналогічну поведінку експериментальних гідрографів та відповідних теоретичних передбачень, зроблених за тривимірним секторним методом.

Другий етап гідрографів відбувається під впливом двох рушійних факторів: з одного боку, плавного переходу поверхневого гідрографа на постійну величину витрати при  $t > t_{con}$ , з іншого – поступовим збільшенням

глибини потоку в місці розташування дощоприймача та переходом його спочатку в режим водозлива з широким порогом, а далі – в режим напірного витікання крізь отвір. Підпір, зумовлений обмеженою пропускною здатністю дощоприймального отвору, зумовлює зворотний вплив вверх по течії на поверхневий потік, утворюючи відповідну кінематичну хвилю, що рухається проти напрямку течії. Результатом такої взаємодії є чітко виражений хвильовий характер експериментальних гідрографів на другому етапі.

Динаміка зміни витрати на третьому етапі експериментальних гідрографів є середньою між відносно швидким зменшенням витрати в секторному та тривимірному секторному методах та значно більш повільним – у методі нелінійного резервуару.

Експериментальні гідрографи стоку, отримані для висотних схем № 2 і № 3 з різними значеннями поздовжнього похилу  $i_x$  та поперечного похилу  $i_y$ , підтвердили важливість врахування реальних геодезичних похилів підбасейна стоку замість прийняття єдиного середнього по площі значення. Відносна різниця між піковими експериментальними витратами стоку для схем № 2 і № 3 становить близько 20 %.

Представлення експериментальних гідрографів у безрозмірних координатах  $Q' = Q/Q_{max}$  та  $t' = t/t_0$  дає в результаті зведення усіх гідрографів у один достатньо вузький масив, осереднені значення якого можна розглядати як універсальний безрозмірний гідрограф стоку, що має місце в дослідженому діапазоні зміни вхідних параметрів.

Статистична обробка параметрів отриманого осередненого експериментального безрозмірного гідрографа стоку дозволила отримати узагальнені залежності: для 1 етапу – просту експоненційну залежність (4.8), для 2 етапу – модель водяної пари, експоненційно-логарифмічну функцію (4.9), для 3 етапу – рівняння Річардса (4.10). Отримані залежності добре відображають граничну поведінку натурних гідрографів: асимптотичне зменшення витрати до нуля при  $t \rightarrow 0$ , а також асимптотичне прямування безрозмірної витрати до нуля при зростанні безрозмірного часу до  $t' \approx 3$ .

На підставі даних натурних обстежень у Франківському р-ні м. Львова розвинуто концепцію ефективних водонепроникних покриттів, а також отримано уточнену функціональну залежність між частками загальних і ефективних водонепроникних покриттів у формі нормалізованої степеневі залежності. При використанні 30 емпіричних результатів для кожного дослідженого кварталу отримане значення степеня  $n_1 = 1,308$ , а при використанні середнього значення водонепроникності всієї дослідженої території –  $n_2 = 1,275$ . Ці значення відповідно на 7,2 % та 9,6 % нижчі порівняно з відповідним значенням  $n = 1,41$ , отриманим Лівінгстоном та Вінхьюзом для м. Денвер, США.

Отриману кореляцію між сумарною та ефективною непроникністю для житлових кварталів міста Львова доцільно застосовувати як важливий параметр покриття басейна стоку при розробленні гідравлічних моделей систем дощового водовідведення в Україні.

Обробкою результатів гідрометеорологічних спостережень у м. Львові за період з 1945 р. по 2018 р. встановлено динаміку довготермінових змін в часі висоти річного шару опадів: зростання у середньому на 1,81 мм/рік, та річної кількості днів з атмосферними опадами: зменшення на  $0,24 \text{ рік}^{-1}$ .

Отримано тенденцію щодо збільшення частоти випадання дощів з екстремально-великими значеннями висоти шару. Отримано залежності максимальної добової висоти шару опадів  $(h_d)_{\max}$  від періоду одноразового перевищення  $P$  при використанні моделі Вейбулла (5.13), моделі ММФ (5.14) та логістичної степеневі моделі (5.15).

На підставі отриманого осередненого експериментального гідрографа стоку в безрозмірних змінних розроблено методику розрахунку гідрографів стоку з натурних підбасейнів стоку та апробовано цю методику для типових підбасейнів стоку за кліматичних умов м. Львова.

Отримано залежність коефіцієнта регулювання максимальної витрати  $\beta_{\max}$  як функції інтенсивності дощу (5.22), що може бути використана при

моделюванні гідрографів стоку з урбанізованих підбасейнів стоку площею 0,02 – 0,2 га.

**Ключові слова:** висота шару опадів, висотна схема, дощове водовідведення, гідрограф стоку, ефективна водонепроникність, загальна водонепроникність, коефіцієнт регулювання витрати, максимальна витрата, масштабні коефіцієнти, підбасейн стоку, регулювальні елементи, резервуар дощових стічних вод, час концентрації стоку.

**Список публікацій здобувача:**

– *статті у наукових фахових виданнях України:*

1. Zhuk V., Mysak I., Petrushka K. Comparison of the methods of surface runoff modelling from the urbanized subcatchments for estimation of peak loads on the environment // Environmental Problems = Екологічні проблеми. 2020. Vol. 5, №1. P. 1–6. doi.org/10.23939/ep2020.01.001 (Index Copernicus).

2. Жук В. М., Мисак І.В. Гідрографи притоку з водонепроникних басейнів стоку за методикою SWMM та за секторним методом. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія "Теорія і практика будівництва". 2019. № 912. С. 41–48.

3. Жук В.М., Бошота В.В., Мисак І.В. Розрахунок кривих депресії при стаціонарному режимі фільтрації поверхневого стоку з ексфільтраційних траншей. Вісник Нац. у-ту "Львівська політехніка". "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація". Львів: НУ "Львівська політехніка". 2011. № 712. С. 50–54.

– *стаття у науковому періодичному виданні, що включене до міжнародних наукометричних баз:*

4. Zhuk V., Vovk L., Matlai I., Popadiuk I., Mysak I., Fasuliak V. Dependency between the total and effective imperviousness for residential quarters of the Lviv city. Journal of Ecological Engineering. 2020. Vol. 21 (5). p. 56–62 doi.org/10.12911/22998993/122191 (Scopus, Web of Science). ISSN 2299-8993.

– *розділ колективної монографії:*

5. Zhuk V., Mysak I. Stormwater hydrographs from the rectangular impervious subcatchments modelled by the modified three-dimensional sector method. Theoretical and Scientific Foundations of Engineering: Monograph. International Science Group. 2020. P. 101–105. Особистий внесок здобувача: виконано аналіз поведінки гідрографів дощового стоку отриманих за тривимірним секторним методом.

– наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Жук В.М., Мисак І.В., Мисак П.В. Гідрографи дощового стоку за модифікованим тривимірним секторним методом для кліматичних умов міста Львова. Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути [зб. наук. пр.]: матеріали V міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (Київ, 3 червня 2020 р.). Київ, 2020. С. 332–338.

7. Mysak I., Zhuk V. Modeling of stormwater hydrographs from the impervious subcatchments using the modified 3D-sector method. Perspective directions for the development of science and practice: Abstracts of XX-th International Scientific and Practical Conference. Athens, Greece 2020. P. 66–69. DOI: 10.46299/ISG.2020.XX

8. Zhuk V., Vovk L., Matlay I., Popadiuk I., Mysak I., Fasuliak V. Dependency between the total and effective imperviousness for residential quarters of the Lviv city. Водопостачання та водовідведення: проектування, будова, експлуатація, моніторинг : матеріали 3-ої Міжнародної науково-практичної конференції, 23-25 жовтня 2019 р., Львів. 2019. С. 121.

9. Жук В.М., Мисак І.В. Підвищення безпеки експлуатації водовідвідних мереж за рахунок затримання поверхневого стоку в регулювальних резервуарах непроточного типу. Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд: тези за матеріалами ІХ Міжнародної наукової конференції ", Харків, 15-16 жовтня 2019 р. 2019. С. 111–113.

10. Жук В.М., Мисак І.В. Зміна кількості атмосферних опадів у місті Львові за період з 1945 по 2018 роки. Ресурси природних вод Карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання. Матеріали 18



Міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів, 23–24 травня 2019 р.): збірник наукових статей Львів: Національний університет "Львівська політехніка", 2019. С. 19–22.

11. Жук В.М., Мальований М.С., Муха О.В., Мисак І.В. Розробка програм управління поверхневим стоком з урбанізованих територій в Україні. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції "Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи". Львів : ЛДУБЖД, 2018. С. 201.

12. Zhuk V., Vovk L., Matlay I., Mysak I. Methods of the estimation of different types cover areas in the modeling of urbanized stormwater catchments. Водопостачання та водовідведення: проектування, будова, експлуатація, моніторинг : матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 18-20 жовтня 2017 р.). 2017. С. 60–62.

13. Мисак І.В., Жук В.М. Вплив початкової інтенсивності інфільтрації в моделі Хортон на гідрографи стоку з типового басейна стоку по вул. Миколайчука у Львові. Ресурси природних вод Карпатського регіону. Проблеми охорони та раціонального використання. Матеріали Шістнадцятої міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів, 25–26 травня 2017 р.): збірник наукових статей Львів: Національний університет "Львівська політехніка", 2017. С. 31–34.

14. Zhuk V.M., Mysak I.V. Stormwater modeling for the territory of Mykolaychuk's Str. district in Lviv. Build Master Class. International scientific-practical conference of young scientists. Conference program and proceedings. Kyiv, 16–18 November 2016. p. 167–168.

15. Бошота В.В., Мисак І.В., Жук В.М. Методи розрахунку фільтраційної витрати з ексфільтраційних траншей. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів "Вода в харчовій промисловості": Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції. Одеса: ОНАХТ, 2011. С. 77.

## ABSTRACT

*Mysak I.V.* Hydraulic modeling of stormwater drainage systems considering the runoff regulation – Manuscript.

Dissertation for academic degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 – Building and Civil Engineering (19 – Architecture and Construction). – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Lviv, 2021.

The problem of urban areas flooding, due to increasing the volume of surface runoff, in Ukraine is exacerbated by growing urbanization trends, climate change and the problematic technical condition of sewerage networks. The analysis indicates that the urgency of this problem will increase in the coming decades. This encourages the scientific and engineering community to develop runoff management strategies and plans, as well as to widely introduce surface runoff control systems into Ukrainian engineering practice, which must be scientifically proved and adapted to local climatic, urban, and economic conditions.

In this work, an important scientific and practical task was solved, namely - development of new and improvement of existing methods of runoff modeling in the built-up territories with reflecting regulatory influence of separate elements of drainage constructions. The results of the work are important for ensuring the comprehensive reliability of settlement's drainage systems in Ukraine in the conditions of constant growing tendencies of urbanization processes and considering global climate changes.

The determining factor for the development and implementation of adequate practical plans for surface runoff management is its scientifically substantiated modeling, which is carried out according to the climate characteristics and parameters of the runoff basin, considering the ranges of their projected change over time.

Modeling the behavior of surface runoff from urban areas is a complex multifactorial problem. It is substantiated that reliable results of complex stormwater drainage networks modeling with the addition of control structures role can be

obtained only with the use of multifactor numerical models implemented in the appropriate computer programs.

The analysis shows that the most widely used tool in the world today for computer simulation of stormwater drainage systems in urban areas is the software package SWMM. However, SWMM uses several simplified approaches to model the hydrological and hydraulic parameters of stormwater drainage systems. To model the primary runoff hydrographs from individual runoff subcatchment, an approximate nonlinear reservoir method is used, in which a subcatchment of arbitrary shape is conventionally considered as a rectangle with equal area (which have a length equal to the surface flow concentration radius), and the slope of the basin is assumed to be the same at all points.

The system of scales of the studied physical quantities was substantiated, for experimental studies of runoff hydrographs. For next scale coefficients combinations of flow depth  $C_H = 1$ , average velocity  $C_V = 1$ , time  $C_t = C_L$ , rain intensity  $C_q = I/C_L$ , stormwater inlet area  $C_\omega = C_L$ , it was possible to achieve on the physical model the same scale of rainfall flow rate, surface flow discharge and flow rate through the inlet  $C_Q = C_L$ ; in addition, at the same time the similarity of the model's parameters and natural phenomena is provided both by the Froude and by the Reynolds numbers.

An experimental installation was designed and developed, on which was performed a set of experiments which allow experimentally model stormwater hydrographs from typical square in terms of subcatchments runoff in the range of values of the geometric scale  $C_L = 10 - 30$ , which corresponds to full-scale subcatchments with sizes from  $15 \times 15$  m to  $45 \times 45$  m. The design of the experimental installation allows to model the runoff hydrographs from flat subcatchments for various high schemes configurations with values of longitudinal and transverse slopes from 0.005 to 0.02. The methods of experimental research and processing of experimental data substantiated in work provide a relative error of definition of the peak discharge less than 0,48 %.

An improved three-dimensional sector method has been substantiated and developed, which allows to consider the actual configuration and height scheme of

urbanized subcatchment runoff by automatically determining slopes for each sector based on data processing on three geodetic coordinates of all characteristic points of the subcatchment. The advantage of the three-dimensional sector method over the simple sector method is to consider the variable slope of the surface to the stormwater for subcatchments with a flat surface.

Considering in the 3D sector method the variable slope of an urban subcatchment surface, depending on the location of the sector, causes significant changes in runoff hydrographs: reduction of surface concentration time by 13.7 % and increase in peak discharge by 11.3 % compared to the traditional sector method. Compared to the nonlinear reservoir method, the 3D sector method gives a peak discharge higher by 43.8 %.

A mathematical model of regulatory influence on stormwater hydrograph of capacitive elements of stormwater drainage systems – from conventional sewage wells to special control stormwater storage tanks (SWST) has been developed. An appropriate numerical algorithm and computer application have been developed to solve the direct and inverse problems of hydraulic modeling: to determine the required volume of capacitive elements at given limit parameters of stormwater runoff hydrographs in given cross sections or to determine runoff hydrograph parameters at given characteristics upper regulatory structures.

The coefficients of the SWST volume obtained by the method proposed in the work are 7.1 – 12.9 times less than the corresponding values obtained by the SPbGASU method, which is explained both by the difference of dimensionless inflow hydrographs and taking into account in the proposed method above the drainage network, which is quantitatively characterized by the coefficient of regulation of the maximum flow rate or the coefficient of filling the free capacity of the network  $\beta$ .

An experimental correlation between the runoff coefficient  $\psi$  and the height of the precipitation layer  $h_d$  was obtained, which can be described with a high accuracy degree by the trend line according to the logistic model. Complex analysis shows, that in the range of  $h_d \approx 7$  mm, the experimental runoff coefficient  $\psi \approx 0.95$ , which

corresponds to the value recommended in the local active methods in Ukraine for calculating the parameters of rain runoff from completely impervious urban runoff basins. As  $h_d$  increases, the runoff coefficient gradually increases, asymptotically approaching the value of  $\psi_{max} = 0.988$ .

The method of experimental determination of the peak discharge of the surface runoff hydrographs has been improved, which include approximating the range of experimental points on the volume curve around the maximum point, which corresponds to the duration of model rain  $t_d$ ; the present error between the calculated values of the peak discharge obtained from linear and quadratic approximations does not exceed 0.18%.

The experimental surface runoff hydrographs obtained on the physical model differ significantly from the theoretical hydrographs determined by the sector and three-dimensional sector method, as well as by the method of nonlinear reservoir. The reason for this difference is the assumption of free outflow from the sub-catchment, which is accepted in all the above theoretical models.

The obtained experimental hydrographs of the inflow into the stormwater manhole consist of three characteristic stages. The first stage corresponds to the process of concentrating surface runoff from the subcatchment and free flow through the stormwater inlet. At this stage, a similar behavior of experimental hydrographs and the corresponding theoretical predictions made by the three-dimensional sector method are obtained.

The second stage of hydrographs is under the influence of two driving factors: on the one hand, the smooth transition of the surface hydrograph to a constant flow rate at  $t > t_{con}$ , on the other – a gradual increase in flow depth at the location of the stormwater inlet and its transition to long crested weir mode, then – in the mode of pressure flow through the orifice. Flooding, caused by the limited capacity of the stormwater inlet, causes the reverse effect upstream on the surface flow, forming a corresponding kinematic wave moving against the direction of flow. The result of this interaction is a clear wave nature of the experimental hydrographs in the second stage.

The dynamics of flow change in the third stage of experimental hydrographs is the average between the relatively rapid decrease of flow rate in the sector and three-dimensional sector methods and much slower – in the method of nonlinear reservoir.

Experimental runoff hydrographs obtained for altitude schemes № 2 and № 3 with different values of their longitudinal slope  $i_x$  and transverse slope  $i_y$ , confirmed the importance of considering the real geodetic slopes of the sub-catchment runoff instead of adopting a single mean value. The relative difference between the peak experimental flow rates for schemes № 2 and № 3 is about 20 %.

Representation of experimental hydrographs in dimensionless coordinates  $Q' = Q/Q_{max}$  and  $t' = t/t_d$  gives as a result of reduction of all hydrographs in one rather narrow array which averaged values can be considered as the universal dimensionless hydrograph of stormwater runoff taking place in the investigated range of change of input parameters.

Statistical processing of the parameters of the obtained averaged experimental dimensionless stormwater hydrograph allowed to obtain generalized dependences: for stage 1 – simple exponential dependence (4.8), for stage 2 – water vapor model, exponential-logarithmic function (4.9), for stage 3 – Richard's equation (4.10). The obtained dependences well reflect the limiting behavior of full-scale hydrographs: asymptotic decrease of the flow to zero at  $t \rightarrow 0$ , as well as asymptotic approach of dimensionless discharge to zero with increasing the dimensionless time to  $t' \approx 3$ .

Based on the data of field surveys in the Frankivsk district of Lviv, the concept of effective impervious covers was developed, as well as a refined functional relationship between the shares of total and effective impervious covers in the form of normalized power dependence. When using 30 empirical results for each studied quarter, the value of the degree  $n_1 = 1.308$ , and when using the average value of water imperviousness of the entire study area –  $n_2 = 1.275$ . These values are 7.2 % and 9.6 % lower, respectively, compared to the corresponding value of  $n = 1.41$  obtained by Livingston and Veenhuis for Denver, USA.

The obtained correlation between total and effective impervious areas for residential quarters of Lviv should be used as the principal parameter of catchment's

cover in the development of hydraulic models of stormwater drainage systems in Ukraine.

Processing of the results of hydrometeorological observations in Lviv for the period from 1945 to 2018 established the dynamics of long-term changes in time of the annual precipitation layer: an increase of 1.81 mm/year on average, and the annual number of days with precipitation: a decrease of 0.24 year<sup>-1</sup>.

There is a tendency to increase the frequency of rainfall with extremely large values of layer height. The dependences of the maximum daily height of the precipitation layer  $(h_d)_{\max}$  on the period of one-time excess  $P$  using the Weibull model (5.13), the MMF model (5.14) and the logistic power model (5.15) were obtained.

Based on the obtained averaged experimental runoff hydrograph in dimensionless variables, a method for calculating runoff hydrographs from natural runoff subcatchments was developed and this technique was tested for typical runoff subcatchment under the climatic conditions of Lviv.

The dependence of the coefficient of regulation of the maximum flow rate  $\beta_{\max}$  as a function of rainfall intensity (5.22) is obtained, which can be used in modeling runoff hydrographs from urbanized runoff subcatchments with an area of 0.02 – 0.2 ha.

**Key words:** precipitation layer height, height scheme, stormwater drainage, stormwater hydrograph, effective imperviousness, total imperviousness, flow control coefficient, peak discharge, scale factors, runoff subcatchment, control elements, stormwater storage tank, runoff concentration time.