

## МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄМУ СТОКУ ПОВЕРХНЕВИХ СТІЧНИХ ВОД НА ПРИКЛАДІ МІСТА КИЇВ

Микола Ситніченко<sup>1</sup>, Ганна Анацька<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»,  
35, Митрополита Василя Липківського вул., м. Київ, Україна, 03035,  
<sup>1,2</sup> Донбаська національна академія будівництва і архітектури  
15, Карпатська вул., м. Івано-Франківськ, Україна, 76019

<sup>1</sup> канд. техн. наук, sytnichenko@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3539-8525

<sup>2</sup> anazkaya935@gmail.com, orcid.org/0000-0001-9695-5810

DOI: 10.32347/2524-0021.2023.45.71-77

**Анотація.** Хоча спостереження за негативним впливом поверхневого стоку на якість води в водних об'єктах мають тривалу історію, розробка національних нормативних актів, які регулюють якість поверхневих вод, відбулася тільки у 2022 році. Відповідно був прийнятий Закон України «Про водовідведення та очищення стічних вод», що вступив в дію в серпні 2023 року та є частиною процесу адаптації законодавства України в галузі водовідведення згідно Директиви Ради Європи 91/271/ЄЕС «Про очистку міських стічних вод». У роботі проаналізовано проблему визначення обсягу річного поверхневого стоку, який підлягає очищенню на очисних спорудах. Використовуючи дані гідрометеорологічної служби про максимальну добову кількість опадів різної забезпеченості для міста Київ, були отримані залежності розподілу ймовірності добових шарів опадів, у вигляді загальної глибини опадів і загальної тривалості опадів. Підтверджено висновок, що переважний обсяг стоку визначається мікродощами, які мають велику частоту повторюваності. Проблема знаходження співвідношення опадів і стоку в нормативних документах України висвітлена не досить докладно, тому виникає необхідність визначення глибини стоку на більш довершеній основі з урахуванням інфільтрації, яка визначається параметрами фільтраційних властивостей ґрунтів. Вплив водонепроникності на шар стоку визначено через моделювання з використанням розподіленої моделі SWMM. Запропоновано параметр F/P, який характеризує об'єм втрат від загальної кількості опадів в залежності від властивостей поверхні, а саме водонепроникності та коефіцієнта фільтрації. Моделювання дозволило отримати залежність параметра F/P від коефіцієнта фільтрації та водонепроникності площі водозбору. Розрахунки підтвердили, що стік в більшості випадків утворюється в результаті випадання опадів, значення яких перевищує 2,5 мм. Для міста Київ розраховано об'єм стоку поверхневих стічних вод за теплий період року з площі 1 га в залежності від коефіцієнта фільтрації ґрунту при водонепроникності 60 %. В результаті цих досліджень рекомендується, щоб очисні споруди вловлювали та очищали дощові стоки з ймовірністю від 70 до 90 % від загальної глибини опадів, які випадають на територію водозбору. При цьому значення об'єму стоку поверхневих стічних вод повинно бути підтверджено розрахунком.

**Ключові слова:** поверхневий стік, обсяг стоку, інфільтрація, коефіцієнт фільтрації, водонепроникність площі водозбору, гідрологія.

© Ситніченко М., Анацька Г., 2023

## ВСТУП

На урбанізованих територіях природний гідрологічний цикл води змінився через появу водонепроникних поверхонь (дахи будівель, вулиці, дороги, тротуари), вони запобігають природному проникненню води в ґрунт [1] і, таким чином, негативно впливають на поповнення ґрунтових вод. Це викликає з одного боку надмірні паводки, а з іншого висихання та зниження рівня ґрунтових вод [2].

Хоча спостереження за зміною якості води водойм виявили істотний негативний вплив поверхневого стоку на якість води водних об'єктів, розробка національних нормативних актів, які регулюють якість поверхневих вод, відбулася тільки у тому році. Відповідно був прийнятий Закон України «Про водовідведення та очищення стічних вод», що вступив в дію в серпні 2023 року та є частиною процесу адаптації законодавства України в галузі водовідведення згідно Директиви Ради Європи 91/271/ЄЕС «Про очистку міських стічних вод».

Згідно з чинними нормативними актами регулювання дощових та талих стічних вод відбувається внаслідок контролю відповідних конкретних забруднюючих речовин і об'ємів скидів поверхневих стічних вод. Об'єм та обсяг поверхневих стічних вод, які утворюються на територіях внаслідок випадіння атмосферних опадів та сніготанення, зараз визначається згідно з ДСТУ 8691:2016 та ДБН В.2.5-75:2013. Шар стоку дощових та талих стічних вод обчислюється як добуток шару опадів за теплий або холодний період року на коефіцієнт стоку дощових чи талих стічних вод, відповідно.

Для житлових територій і промислових підприємств першої групи величина шару опадів, який підлягає очищенню, відповідає добовому шару опадів від мало інтенсивних часто повторюваних дощів з періодом однократного перевищення розрахункової інтенсивності від 0,05 до 0,1 року, що для більшості населених пунктів України забезпечує приймання на очищення не менш 70 % річного обсягу поверхневого стоку [3].

*Urbonas B.* та ін. [4] розглянули взаємо-

зв'язок між загальною глибиною опадів та річною кількістю опадів і процентом стоку. Встановлено, що дощі глибиною від 0,1 до 0,5 дюймів викликають стік, а їх кількість становить 76% від загальної кількості опадів. Виходячи з цього вони визначили стік, що утворюється в результаті випадання опадів у розмірі 0,6 дюйма, як цільовий показник *WQCV*, що відповідає 80-му процентилю штормового явища.

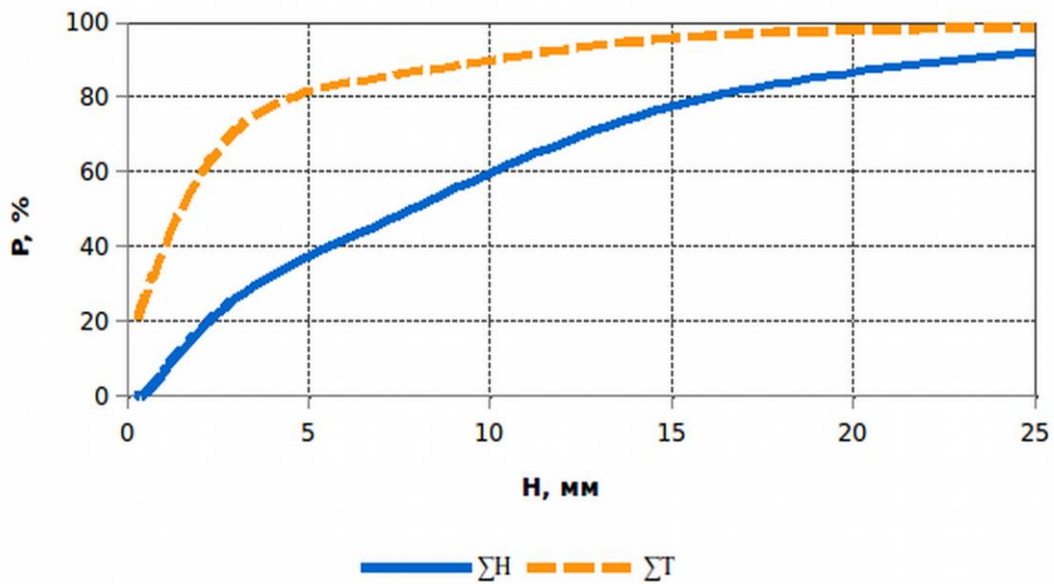
## МЕТА І МЕТОДИ

Метою даного дослідження є формування науково обґрунтованих рекомендацій щодо визначення об'єму поверхневих стічних вод, який утворюється на територіях внаслідок випадіння атмосферних опадів та сніготанення, які повинні базуватися на екологічній необхідності, економічній доцільності й технологічних можливостях його затримання.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Використовуючи методику [3], та дані гідрометеорологічної служби про максимальну добову кількість опадів різної забезпеченості [5], були отримані кумулятивні функції розподілу ймовірності добових шарів опадів, що випадають у вигляді дощу за теплий період року для міста Київ (див. рис. 1), у вигляді загальної глибини опадів (суцільна лінія) і загальної тривалості опадів (штрихова лінія).

Проаналізуємо вітчизняні й закордонні нормативні вимоги щодо обсягу поверхневого стоку, який підлягає очищенню, на прикладі м. Київ. Відповідно до пункту 5.8 ДБН В.2.5-75:2013 ми повинні забезпечити очищення не менш 70 % річного обсягу поверхневого стоку. За графіком визначаємо, що добовий шар опадів, при якому забезпечується надходження на очисні споруди 70% сумарної тривалості дощів і сумарної кількості опадів, відповідно, становить 2,9 мм і 12,5 мм. Добовий шар опадів від дощів з періодом однократного перевищення розрахункової інтенсивності *S* від 0,05 до 0,1 року, відповідно, становить 3,8 мм і 6,5 мм. Обсяг поверхневого стоку згідно з *WQCV*, який відводиться на очисні



**Рис. 1.** Кумулятивні функції розподілу ймовірності добових шарів опадів, що випадають у вигляді дощу, для міста Київ у вигляді загальної глибини опадів (суцільна лінія) і загальної тривалості опадів (штрихова лінія)

**Fig. 1.** Cumulative functions of the probability distribution of daily layers of precipitation falling in the form of rain for the city of Kyiv in the form of total depth of precipitation (solid line) and total duration of precipitation (dashed line)

спорути в США, відповідає ймовірності 85 % [6] від загальної глибини опадів, добовий шар опадів становить 19,7 мм. Переважна кількість дощів що випадає в м. Київ являє собою невеликі та часто повторювані дощі з глибиною опадів до 10 мм. Збір і очищення зливових вод від цих невеликих дощів, що часто повторюються, є рекомендованим підходом для визначення об'ємів дощових стічних вод, закладеним як у першому, так і в другому випадку.

Гідрологічне проектування каналізаційних систем ґрунтується на обчисленні співвідношення опадів і стоку. Проблема знаходження цього співвідношення в нормативних документах України висвітлена дуже примітивно і приблизно і для знаходження об'єму поверхневого стоку використовують коефіцієнт стоку, який має дуже велику невизначеність. Більш науково обґрунтованою є концепція величини стоку *WQCV*, при визначенні якої для непроникних зон від значення глибини опадів не враховують 0,1 дюйма депресії і яка є похідною від глибини середнього стоку викликаного дощем [7].

Тому виникає необхідність визначення глибини стоку на більш довершеній основі з урахуванням інфільтрації шляхом використання рівнянь *Horton* [8], *Philip* [9], і формули *Green and Ampt* [10]. Для моделювання інфільтрації необхідні параметри фільтраційних властивостей ґрунтів, які для умов України найбільш повно проаналізовані в роботі [11].

Щоб оцінити вплив водонепроникності на шар стоку виконано моделювання з використанням розподіленої моделі *SWMM* [12]. При моделюванні розглядався поверхневий стік з верхньої непроникної зони до нижньої проникної, яка знаходиться нижче за течією, тобто вона пропускає через себе стік з верхньої зони й одночасно відбувається його інфільтрація. Ділянка, яка моделювалася, мала площу 1 га з розмірами 100 на 100 метрів. Непроникність площі водозбору визначена в частках одиниці як відношення непроникної площі до загальної площі водозбору.

Розрахунок втрат відбувався за допомогою формули *Philip*

$$F = s * \sqrt{t} + k * t \quad (1)$$

де  $F$  – загальна глибина інфільтрації;  $s$  – емпіричний параметр, пов'язаний зі швидкістю проникнення фронту змочування;  $k$  – значення інфільтрації, яке

близьке до значення коефіцієнта фільтрації;  $t$  – час.

Параметри  $s$ ,  $k$  і  $t$  для умов м. Київ наведені в табл. 1.

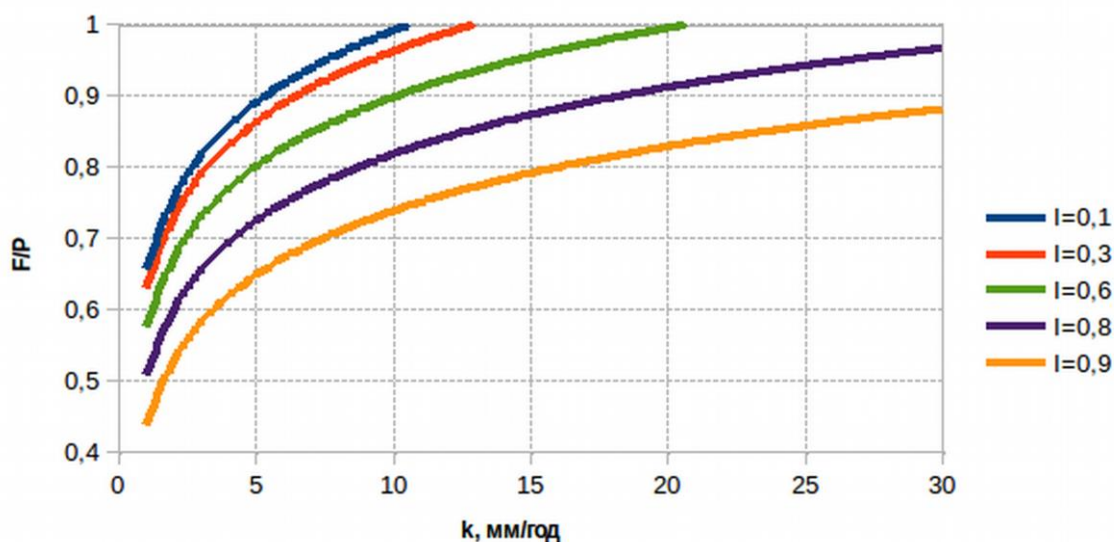
**Табл. 1.** Параметри для формули Philip  
**Table 1.** Parameters for the Philip formula

$s$	0,08588	0,15179	0,19103	0,23838	0,29405	0,34734
$k$ , см/хв	0,00167	0,00667	0,01167	0,02	0,03333	0,05
$t$ , хв	60	60	60	60	60	60

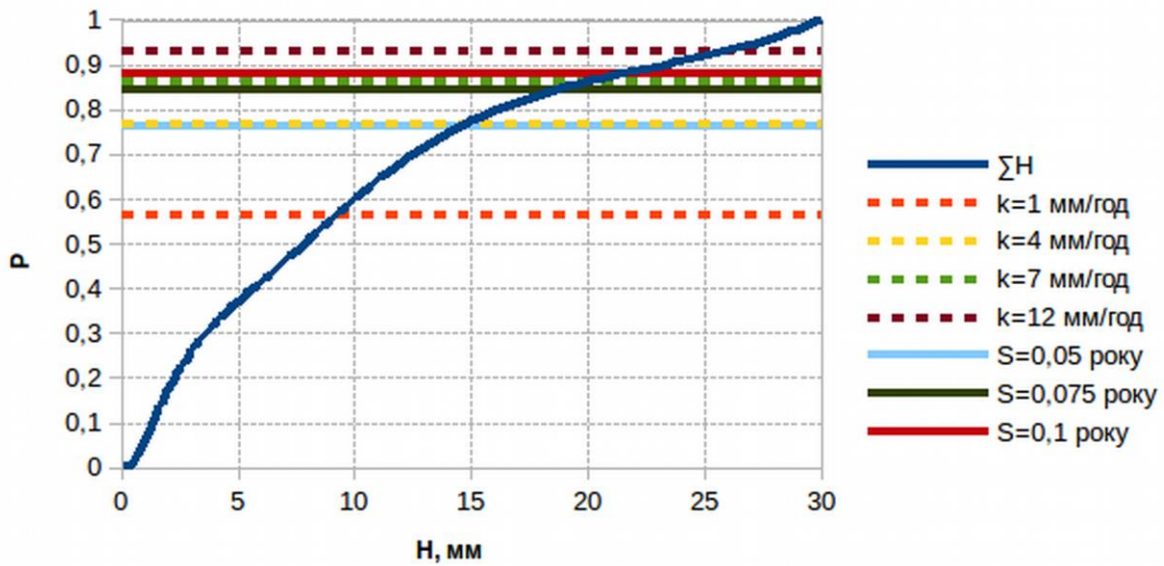
Використовуючи абстракцію, що коефіцієнт стоку це відношення шару стоку до глибини опадів, ми можемо визначити ймовірність добового шару опадів у вигляді загальної глибини опадів як відношення загальних втрат опадів до загальної глибини опадів. Фізичний зміст розрахунку полягає в визначенні параметра  $F/P$ , де  $F$  дорівнює сумарним втратам,  $P$  – глибині опадів, який відповідає ймовірності добових шарів опадів. Моделювання параметра  $F/P$  з урахуванням водонепроникності площі водо-збору та коефіцієнту фільтрації дозволило отримати криві, які наведені на рис. 2. Параметр  $F/P$  характеризує об'єм втрат від загальної кількості опадів в залежності від

властивостей поверхні, а саме водонепроникності та коефіцієнта фільтрації. Знаючи об'єм втрат, ми можемо визначити об'єм стоку поверхневих стічних вод, які утворюються на територіях внаслідок випадіння атмосферних опадів та сніготанення.

Значення параметра  $F/P$  при водонепроникності  $I = 0,6$  і відповідному коефіцієнту фільтрації ґрунту  $k$  як і ймовірності періоду однократного перевищення розрахункової інтенсивності  $S$  нанесені на графік кумулятивної функції розподілу ймовірності добових шарів опадів, що випадають у вигляді дощу, для міста Київ у вигляді загальної глибини опадів рис.3.



**Рис. 2.** Залежність параметра  $F/P$  від коефіцієнта фільтрації  $k$  і водонепроникності  $I$   
**Fig. 2.** Dependence of the  $F/P$  parameter on the filtration coefficient  $k$  and imperviousness  $I$



**Рис. 3.** Кумулятивна функція розподілу ймовірності добових шарів опадів, що випадають у вигляді дощу, для міста Київ у вигляді загальної глибини опадів ( $\Sigma H$ ) і значень параметра  $F/P$  при водонепроникності  $I = 0,6$  і відповідному коефіцієнті фільтрації ґрунту  $k$  і ймовірності періоду однократного перевищення розрахункової інтенсивності  $S$

**Fig. 3.** The cumulative distribution function of the probability of daily layers of precipitation falling as rain for the city of Kyiv in the form of the total depth of precipitation ( $\Sigma H$ ) and the values of the  $F/P$  parameter at waterproofness  $I = 0.6$  and the corresponding soil filtration coefficient  $k$  and the probability of a period of single exceedance calculated intensity  $S$

Встановлено, що при коефіцієнті фільтрації ґрунту 1, 4, 7, 12 мм/год, і ймовірності 0,56, 0,77, 0,86, 0,93, глибина добових опадів, які викликають стік, становить 9,2, 14,8, 20,2, 25,9 мм, відповідно (рис. 3). Таким чином, глибина добових опадів згідно з рис. 1 при загальній тривалості опадів 56, 77, 86, 93 % становить 1,84, 3,85, 7,47, 12,24 мм.

Розрахунки підтвердили рекомендації *Urbanas B.* та ін. [4], що стік в більшості випадків утворюється в результаті випадання опадів, значення яких перевищує 2,5 мм (0,1 дюйма).

Значення об'єму стоку поверхневих стічних вод  $V$  за теплий період року з площі 1 га в залежності від коефіцієнта фільтрації ґрунту  $k$  при водонепроникності 60 % для міста Київ наведені в табл. 2.

**Табл. 2.** Об'єм стоку поверхневих стічних вод в залежності від коефіцієнта фільтрації ґрунту

**Table 2.** The volume of surface wastewater flow depending on the soil filtration coefficient

$k$ , мм/год	1	4	7	12	20	30
$V$ , м <sup>3</sup>	1846,03	980,31	575,48	296,42	67,27	0

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Запропоновано параметр  $F/P$  який характеризує об'єм втрат від загальної кількості опадів в залежності від властивостей поверхні, а саме водонепроникності та коефіцієнта фільтрації.

Отримана залежність параметра  $F/P$  від коефіцієнта фільтрації та водонепроникності площі водозбору.

Встановлено, що стік в більшості випадків утворюється в результаті випадання опадів, значення яких перевищує 2,5 мм.

Для міста Київ отримані значення об'єму стоку поверхневих стічних вод за теплий період року з площі 1 га в залежності від коефіцієнта фільтрації ґрунту при водонепроникності площі водозбору 60 %.

В результаті цих досліджень рекомендується, щоб очисні споруди вловлювали та очищали дощові стоки з ймовірністю від 70 до 90 % від загальної глибини опадів, які випадають на територію водозбору. При цьому значення об'єму стоку поверхневих стічних вод повинно бути підтверджено розрахунком.

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Paul M. J., Meyer J. L.** Streams in the Urban landscape // *Annual Review Ecology and Systematics*, 2001. 32(1). 333–365.
2. **Hlavínek P., Prax P., Sklenářová T., Dvořáková D., Polášková K., Kubík J., Hlušík P., Beránek J.** Hospodaření s dešťovými vodami v urbanizovaném území. Brno: Ardec, 2007. 164 s. ISBN: 80-86020-55-X
3. Временные рекомендации по проектированию сооружений для очистки поверхностного стока с территории промышленных предприятий и расчету условий выпуска его в водные объекты. Москва: ВНИИ ВОДГЕО, 1983.
4. **Makar W. P., Urbonas B.** Incipient Runoff Value of Rainfall in the Denver Region // *Flood Hazard News, Urban Drainage and Flood Control District*, Denver, Colorado, 1989.
5. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3, части 1-6, вып. 10 Украинская ССР Книга 1. Ленинград: Гидрометеиздат, 1990.
6. **Butler D., Davies J. W.** *Urban Drainage*. 3rd Edition. CRC Press, 2010.
7. **Driscoll E., Palhegyi G., Strecker E., Shelley**

**P.** Analysis of Storm Event Characteristics for Selected Rainfall Gauges Throughout the United States. Prepared for the U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Woodward-Clyde Consultants: Oakland, CA, 1989.

8. **Horton R. E.** The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle // *Transactions of the American Geophysical Union*, 1933. 14(1), 446-460.

9. **Philip I. R.** The Theory of Infiltration // *Soil Science*, Vol. 83, 1957, pp. 345-357; and 1958, pp. 435-458.

10. **Green W. H., Ampt G. A.** Studies on Soil Physics. The Flow of Air and Water Through Soils // *Journal of Agricultural Soils*, 1911. 4, 1-24.

11. **Осипов В. В., Бігун О. М.** Оцінка педотрансферних функцій для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунтів України // *Вісник Харківського університету імені В.Н. Каразіна, Серія Геологія. Географія. Екологія*. 2020. 52. 68-78.

12. **United States Environmental Protection Agency.** Storm Water Management Model (SWMM). Available at: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> (date of access: 09.10.2023).

## REFERENCES

1. **Paul, M. J., & Meyer, J. L. (2001).** Streams in the Urban landscape. *Annual Review Ecology and Systematics*, 32(1), 333–365. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114040>
2. **Hlavínek, P., Prax, P., Sklenářová, T., Dvořáková, D., Polášková, K., Kubík, J., Hlušík, P., & Beránek, J. (2007).** *Stormwater management in Urbanized areas*. Brno: Ardec. ISBN: 80-86020-55-X
3. Temporary recommendations for the design of structures for treating surface runoff from the territory of industrial enterprises and calculating the conditions for its release into water bodies. Moscow: VNI VODGEO, 1983. [in Russian]
4. **Makar, W.P., & Urbonas, B. (1989).** Incipient Runoff Value of Rainfall in the Denver Region. *Flood Hazard News, Urban Drainage and Flood Control District*, Denver, Colorado.
5. Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Series 3, parts 1-6, no. 10 Ukrainian SSR Book 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990.
6. **Butler, D., & Davies, J. W. (2010)** *Urban Drainage*. 3rd Edition. CRC Press.
7. **Driscoll, E., Palhegyi, G., Strecker, E., & Shelley, P. (1989).** Analysis of Storm Event

- Characteristics for Selected Rainfall Gauges Throughout the United States. Prepared for the U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Woodward-Clyde Consultants: Oakland, CA.
8. **Horton, R.E. (1933).** The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle. *Transactions of the American Geophysical Union*, 14(1), 446-460. <http://dx.doi.org/10.1029/TR014i001p00446>.
9. **Philip, I. R. (1957), (1958).** The Theory of Infiltration. *Soil Science*, 83, 345-357; 435-458.
10. **Green, W. H., & Ampt G. A. (1911).** Studies on Soil Physics. The Flow of Air and Water Through Soils. *Journal of Agricultural Soils*, 4, 1-24. <https://doi.org/10.1017/s0021859600001441>
11. **Osypov, V. V., Bigun, O. M. (2020).** Estimation of pedotransfer functions for determination of soil filtration coefficient of Ukraine. *Bulletin of Kharkiv V. N. Karazin University. Series Geology. Geography. Ecology*, 52, 68- 78. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-05>. [in Ukrainian]
12. **United States Environmental Protection Agency.** Storm Water Management Model (SWMM). Available at: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> (date of access: 09.10.2023).

## Simulation of surface wastewater flow volume using the city of Kyiv as an example

*Mykola Sytnichenko, Hanna Anatska*

**Abstract.** Although observations of the negative impact of surface runoff on water quality in water bodies have a long history, the development of national regulations governing surface water quality took place only in 2022. Accordingly, the Law of Ukraine "On Water Drainage and Wastewater Treatment" was adopted, which entered into force in August 2023 and is part of the process of adapting Ukrainian legislation in the field of water drainage in accordance with Council of Europe Directive 91/271/EEC "On Urban Wastewater Treatment". The paper analyzes the problem of determining the volume of annual surface runoff to be cleaned at treatment facilities. Using the data of the hydrometeorological service on the maximum daily amount of precipitation of various types for the city of Kyiv, the dependences of the distribution of the probability of daily layers of precipitation, in the form of the total depth of precipitation and the total duration of precipitation, were obtained. The conclusion that the predominant volume of runoff is determined by microrains that have a high frequency of recurrence is confirmed. The problem of finding the ratio of precipitation and runoff in the regulatory documents of Ukraine is covered very primitively, which is why there is a need to determine the depth of runoff on a more advanced basis, taking into account infiltration, which is determined by the parameters of the filtration properties of soils. The effect of imperviousness on the drain layer is determined through simulations using the SWMM distributed model. The F/P parameter is proposed, which characterizes the volume of losses from the total amount of precipitation depending on the properties of the surface, namely waterproofness and filtration coefficient. The modeling made it possible to obtain the dependence of the F/P parameter on the filtration coefficient and the imperviousness of the catchment area. Calculations confirmed that the runoff in most cases is formed as a result of precipitation, the value of which exceeds 2.5 mm. For the city of Kyiv, the volume of surface wastewater runoff for the warm period of the year from an area of 1 ha was calculated depending on the soil filtration coefficient at 60% imperviousness. As a result of these studies, it is recommended that sewage treatment plants capture and treat rainwater with a probability of 70 to 90% of the total depth of precipitation that falls on the catchment area. At the same time, the value of the flow volume of surface wastewater must be confirmed by calculation.

**Keywords:** surface runoff, runoff volume, infiltration, filtration coefficient, imperviousness of catchment area, hydrology.

Стаття надійшла до редакції 9.11.2023