



УДК 504.4.054

DOI <https://doi.org/10.32782/geotech2025.39.05>**Проскурнін О.А., Жук В.М., Кирпичова І.В., Суліма Є.О., Цапко Н.С.**

Проскурнін О.А., доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, НДУ «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», ORCID 0000-0001-9774-9306, proskurnin_o@ukr.net

Жук В.М., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гідротехніки та водної інженерії, Національний університет «Львівська політехніка», ORCID 0000-0002-2275-0799, zhuk_vm@ukr.net

Кирпичова І.В., кандидат біологічних наук, доцент кафедри садово-паркового господарства та екології, ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка», ORCID 0000-0003-4633-9379, kirinopsis@gmail.com

Суліма Є.О., аспірант, НДУ «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», ORCID 0000-0002-1006-3174, vcomfy1456@gmail.com

Цапко Н.С., кандидат технічних наук, доцент, перший заступник директора, НДУ «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», ORCID 0000-0003-2480-3636, tsapkonatali@gmail.com

ВРАХУВАННЯ ДИНАМІКИ ІНФІЛЬТРАЦІЇ В ЗАДАЧАХ НОРМУВАННЯ СКИДУ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН ІЗ ПОВЕРХНЕВИМ СТОКОМ

Статтю присвячено проблемі розрахунку обсягу дощових стічних вод із водопроникних поверхонь у задачах нормування скидів забруднювальних речовин у водні об'єкти. Проблема існуючої методології нормування полягає у тому, що розрахунок не враховує динаміки зміни водопроникності ґрунту. У статті розглянуто різні математичні моделі інфільтрації дощової води у ґрунт земної поверхні. Зазначено, що деякі описані в літературі моделі інфільтрації не мають достатньої апробації і з цієї причини не рекомендовані для використання в задачах нормування скидів забруднювальних речовин зі стічними водами. Також, на думку авторів, низка існуючих методів розрахунку витрати дощових вод не є доцільною у цих задачах через велику обчислювальну складність. У статті приділено увагу експоненційній моделі інфільтрації Хортон, широко представленій у науковій літературі, та розрахунку кількості дощових стічних вод CN-методом. Зазначається, що в разі використання моделі Хортон потрібно враховувати початкову затримку стоку дощових вод, спричинену двома факторами: можливою високою початковою інфільтрацією та заповненням водою западин на поверхні. Виведено формулу розрахунку початкової часової затримки стоку дощових вод. Зазначено, що проблема використання моделі Хортон полягає також у невизначеності її параметрів. Ця обставина перешкоджає її використанню в задачах нормування скидів забруднювальних речовин із дощовими стічними водами, оскільки це потребуватиме на всіх підприємствах-водокористувачах проводити трудомісткі та витратні дослідження властивостей ґрунту на водозбірній території. У статті наводиться демонстраційний розрахунок витрат дощових стічних вод різними методами на прикладі водозбірної території локомотивного депо ім. Т. Г. Шевченка (м. Сміла Черкаської області). Звертається увага на суттєву різницю результатів розрахунку різними методами. Авторами зроблено висновок на користь використання в задачах нормування скидів CN-методу, який опосередковано враховує динаміку водопроникності ґрунту. Реалізація цієї пропозиції потребуватиме, по-перше, внесення змін до існуючої методичної бази розрахунків гранично-допустимих скидів речовин у водні об'єкти, по-друге, ідентифікацію водозбірної поверхні підприємств відповідно до класифікації Служби охорони природних ресурсів США.

Ключові слова: гранично-допустимий скид, стічні води, дощові води, інфільтрація, коефіцієнт стоку.

Загальна суть проблеми. У сучасному світі одним із суттєвих джерел забруднення водних об'єктів (ВО) є дощовий стік із промислових, сільськогосподарських та комунальних підприємств, разом з яким у поверхневі води потрапляють продукти ерозії ґрунту, пил, продукти складування на майданчиках підприємств, нафтопродукти, викиди забруднювальних речовин (ЗР) від промислових підприємств, які потрапляють в атмосферу, а потім з опадами забруднюють водозбірну територію і з дощовою водою потрапляють до ВО (Проскурнін, 2023). Для збереження водних ресурсів від високого рівня забруднення виникає потреба в проведенні розрахунку гранично допустимого скиду (ГДС) забруднювальних речовин, що

потрапляють з територій підприємств до поверхневих ВО з дощовими стічними водами (СВ) (Ткачук, Жук, 2012). ГДС – це маса речовини в зворотних водах, максимально допустима до відведення з установленим режимом у цьому пункті ВО на одиницю часу з метою забезпечення норм якості води в контрольному створі. Тому однією з підзадач розрахунку ГДС є розрахунок витрати СВ. Це стосується і дощових СВ.

Аналіз останніх досліджень. Методичною базою встановлення ГДС є Методичні рекомендації розроблення нормативів ГДС (МР) (Про затвердження Методичних..., 2021). У випадку одного випуску СВ розрахункова допустима концентрація ЗР за неврахування процесу самоочищення води (що виправдано в разі

невеликих відстаней від випуску до контрольного створу водоприймача) дорівнює:

$$C_{ГДС} = N \cdot (C_{ГДК} - C_{\phi}) + C_{\phi}, \quad (1)$$

де N – кратність розбавлення стічних вод у разі їх переміщення до контрольного створу; $C_{ГДК}$ – гранично допустима концентрація речовини (ГДК) у природній воді, що відповідає визначеному виду водокористування, мг/дм³ (Про затвердження Гігієнічних..., 2022).

Метод розрахунку кратності розбавлення N вибирається згідно з (Про затвердження Методичних..., 2021), залежно від типу водоприймача (водотік, море або невелика водойма) та його гідрологічних параметрів. Але у всякому випадку величина N залежить від витрати стічних вод q .

У розрахунку ГДС ЗР з дощовими СВ максимальна секундна їх витрата проводиться згідно з ДБН В.2.5-75:2013 (ДБН, 2013) за формулою:

$$q = \frac{\psi \cdot \left[q_{20} \cdot 20^n \cdot \left(1 + \frac{\lg P}{\lg m_r} \right)^{\gamma} \right]^{1.2} \cdot F}{t_r^{1.2 \cdot n - 0.1}} \cdot \eta \cdot m, \quad (2)$$

де ψ – середнє значення коефіцієнта стоку; q_{20} – шар дощу тривалістю 20 хв для періоду однократного перевищення, мм; F – водозбірна площа, га; t_r – розрахункова тривалість протікання дощових СВ по поверхні та трубах, хв; n , η , m_r , γ – параметри, які визначаються згідно з ДБН В.2.5-75:2013 залежно від місцевості.

Як можливий інструмент розрахунку витрати дощових СВ у МР також значиться ДСТУ (ДСТУ, 2016). Але на практиці для розрахунку ГДС використовують лише ДБН В.2.5-75:2013, оскільки розрахункові формули цього документа вважаються більш науково обґрунтованими.

Суттєвим недоліком такого розрахунку витрати дощових СВ є неврахування динаміки водопроникності ґрунту. В роботах (Жук, Матлай, 2012; Zhuk, Vovk, 2020) було зазначено, що інтенсивність інфільтрації швидко знижується на початку дощу, а через деякий період часу прагне до приблизно постійного значення. Дощова вода заповнює поровий об'єм ґрунту та знижує капілярні сили, тому зростає вплив гравітаційних сил, що сприяють переміщенню вниз вільної вологи. Також частинки глини в ґрунті можуть набухати в разі намокання й тим самим зменшувати розмір пор, що призводить до зменшення водопроникності.

У роботі (Суліма, 2024) розрахунок величини інфільтрації дощу f пропонувалося проводити за допомогою експоненціальної моделі Хортон (Horton, 1939):

$$f(t) = (f_0 - f_c) \cdot e^{-k \cdot t} + f_c, \quad (3)$$

де f_0, f_c – відповідно початкова та кінцева інтенсивність інфільтрації, мм/год; k – коефіцієнт затухання, год⁻¹.

Також у літературі описані моделі Попова (Поров, 1952) (як і модель Хортон, експоненційна, але коефіцієнт затухання в ній прямо залежить від інтенсивності дощу) та степова модель Костякова (Santos et al., 2014). Але в сучасних публікаціях модель Попова практично

не зустрічається, у неї недостатня апробація, тому її включення в методологію розрахунку ГДС є недоцільним. Аналогічна ситуація зі ступеневою моделлю Костякова. Але якщо в майбутньому будуть проведення відповідні дослідження (бажано і теоретичні, і експериментальні) щодо адекватності інфільтраційних моделей Попова та Костякова, то до питання їх використання в задачах розрахунку ГДС речовин можна повернутися.

Є також багато емпіричних методів для визначення інфільтраційних втрат у басейні стоку. Наприклад, рівняння Річардса (1931 р.) та Шварцендрубера (1969 р.) є фізично-обґрунтованими. Вони розв'язуються для одновимірної інфільтрації як для однофазної системи (вода), так і для двофазної (вода і повітря) (Maus, 2001). Проте внаслідок значної обчислювальної складності вони не отримали широкого застосування в практичних розрахунках.

Інший клас методів становлять так звані індексні методи, серед яких найвідомішими є метод Ф-індексу та метод порядкових кривих (CN-метод), який на цей час найчастіше використовується в інженерній практиці США (Urban Hydrology, 1986).

Метою роботи є розробка пропозицій щодо вибору способу врахування динаміки водопроникності ґрунту в задачах нормування ГДС забруднювальних речовин, що потрапляють до водних об'єктів зі дощовими СВ.

Основний матеріал. У разі використання методу Хортон для розрахунку обсягу дощових вод бажано коефіцієнт стоку розглядати як змінну в часі величину (Santos et al., 2016; Rostami et al., 2014):

$$\psi(t) = \frac{g - f(t)}{g} = 1 - \frac{f(t)}{g}, \quad (4)$$

де g – інтенсивність дощу, мм/год.

Тоді середнє значення коефіцієнта стоку дорівнює:

$$\psi_{\text{ср}} = \frac{\int_0^T \psi(t) dt}{T} = \frac{\int_0^T \frac{g - f(t)}{g} dt}{T} = \frac{\int_0^T \left(1 - \frac{f(t)}{g} \right) dt}{T} = 1 - \frac{\int_0^T f(t) dt}{T \cdot g}. \quad (5)$$

Інтегруючи $f(t)$ з урахуванням (3), отримуємо:

$$\psi_{\text{ср}} = 1 - \frac{f_c}{g} + \frac{(f_0 - f_c)}{k \cdot g \cdot T} \cdot [\exp(-kT) - 1]. \quad (6)$$

Перша проблема використання моделі Хортон ускладнюється невизначеністю її параметрів. Тому для адекватних розрахунків треба проводити лабораторні дослідження ґрунту з метою визначення інтенсивності початкової інфільтрації, кінцевої інфільтрації та коефіцієнта затухання. Але такі дослідження є ресурсовитратними і їх проведення суто для задач розрахунку ГДС речовин є недоцільним. (Слід зазначити, що в цій статті не розглядаються лісові ґрунти, які мають значну фільтраційну анізотропію, оскільки нормування складу поверхневих стічних вод із лісової території водним законодавством України не передбачено.)

Іншою проблемою є можливе перевищення початкової інфільтрації f_0 інтенсивності дощу g . У цьому разі на

початку дощу вся рідина потрапляє до ґрунту і тому $\psi = 0$. Тоді інфільтрація описується більш складною залежністю:

$$f(t) = \begin{cases} g \cdot t, & t \leq t^*, \\ (f_0 - f_c) \cdot e^{-k \cdot t} + f_c, & t > t^*, \end{cases} \quad (7)$$

де t^* – момент часу, з якого починається стік.

За відсутності початкового затримання величина t^* знаходиться з рівняння:

$$(f_0 - f_c) \cdot e^{-k \cdot t^*} + f_c = g. \quad (8)$$

Розв'язуючі рівняння (8), отримуємо:

$$t^* = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{f_0 - f_c}{g - f_c} \right). \quad (9)$$

Якщо враховувати також початкове затримання дощу, яке викликане заповненням впадин на поверхні, то момент часу, з якого починається стік дощових вод, збільшується:

$$t^* = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{f_0 - f_c}{i_0 - f_c} \right) + \frac{H_0}{g}, \quad (10)$$

де H_0 – шар початкового затримання дощу.

З урахуванням (10) отримуємо значення середнього коефіцієнта стоку для випадку $f_0 > g$ з $t \in [t^*, T]$:

$$\psi_{\text{сеп}} = 1 - \frac{f_c}{g} + \frac{(f_0 - f_c)}{k \cdot g \cdot (T - t^*)} \cdot [\exp(-kT) - \exp(-kt^*)]. \quad (11)$$

Оскільки з $t \in [0; t^*]$ коефіцієнт стоку дорівнює нулю, то остаточно за період дощу T :

$$\psi_{\text{сеп}} = \frac{T - t^*}{T} \cdot \left[1 - \frac{f_c}{g} + \frac{(f_0 - f_c)}{k \cdot g \cdot (T - t^*)} \cdot [\exp(-kT) - \exp(-kt^*)] \right]. \quad (12)$$

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 (Urban Hydrology, 1986). В основі методу лежить таке припущення:

$$\frac{H_{\text{ст}}}{H_{\text{надл}}} = \frac{H_{\text{надл}}}{(H_{\text{надл}} + H_{\text{нас}})}, \quad (13)$$

де $H_{\text{ст}}$ – висота шару стоку; $H_{\text{надл}} = (H_0 - H_{\text{о}})$ – висота надлишкового шару опадів, яка визначається як різниця шару опадів H_0 та шару початкового затримання $H_{\text{о}}$; $H_{\text{нас}}$ – висота шару насичення, що характеризує максимальні інфільтраційні можливості басейна стоку.

На підставі експериментальних результатів нормативний документ TR-55 рекомендує вважати: для умов щільної міської забудови:

$$H_{\text{о}} = 0,1 \cdot H_{\text{нас}}, \quad (14)$$

в інших випадках:

$$H_{\text{о}} = 0,2 \cdot H_{\text{нас}}. \quad (15)$$

Тоді середній коефіцієнт стоку визначається як функція відношення $H_{\text{нас}}/H_0$:

$$\psi_{\text{сеп}} = \frac{(1 - 0,2 \cdot H_{\text{нас}} / H_0)^2}{1 + 0,8 \cdot H_{\text{нас}} / H_0}. \quad (16)$$

Як видно з (16), коефіцієнт стоку опосередковано залежить від кількості опадів.

Висота насичення $H_{\text{нас}}$, згідно з (Urban Hydrology, 1986), визначається залежно від безрозмірного параметра CN, який, зі свого боку, знаходиться за детально розробленими таблицями залежно від призначення земельної ділянки та типу ґрунтів, які становлять басейн стоку. Розрахункова формула для $H_{\text{нас}}$ у мм така:

$$H_{\text{нас}} = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{\text{CN}} - 10 \right). \quad (17)$$

Основними факторами, які впливають на величину параметра CN, є господарське призначення території басейна стоку та гідрологічна група ґрунтів. Усі ґрунти, залежно від фільтраційних характеристик, згідно з класифікацією SCS, поділяються на 4 гідрологічні групи: А, В, С, D (табл. 1).

Таблиця 1. Критерії для вибору гідрологічної групи ґрунтів (Mays, 2001, Urban Hydrology, 1986)

Table 1. Criteria for selection of hydrological group of soils (Mays, 2001, Urban Hydrology, 1986)

Гідрологічна група ґрунтів згідно з SCS	Опис ґрунтів
A	Піщані та гравійні ґрунти значної товщини. Мають високу швидкість інфільтрації навіть у повністю змоченому стані
B	Добре дреновані ґрунти з діапазоном фракцій від середніх дрібних до середніх крупних. Середня або велика товщина шару
C	ґрунти з підповерхневим шаром, який перешкоджає низхідному руху води або ґрунти з діапазоном фракцій від дрібних до середніх
D	ґрунти, складені основним чином із глини; ґрунти з постійно високим рівнем ґрунтових вод; ґрунти з біляповерхневим розташуванням шару глини або ж малопотужні ґрунти, які розташовані над майже водонепроникними породами

У табл. 2 наведено найбільш характерні випадки визначення параметра CN, які можуть бути використані також в українській інженерній практиці.

Визначивши параметр CN і задаючись величиною H_0 , можна розрахувати висоту шару $H_{\text{нас}}$ за формулою (17) і після цього розрахувати коефіцієнт стоку за (16).

Перевагою CN-методу є відсутність великих розбіжностей у визначенні параметрів моделі. Технічним недоліком є складна формалізація методу.

Нижче наведено демонстраційний розрахунок витрати дощових СВ для водопроникних поверхонь підприємства ВП «Локомотивне депо» ім. Т. Г. Шевченка в м. Сміла Черкаської області (Проект, 2022). Для спрощення розглядається дощ постійної інтенсивності

Таблиця 2. Значення параметра CN (Urban Hydrology, 1986)
Table 2. CN parameter value

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

протягом $T = 20$ хв. Інші параметри для розрахунку витрати дощових вод такі (ДБН, 2013): $q_{20} = 97,9$ л/с/га, $t_r = 28,063$ хв, $n = 0,69$, $\eta = 1$, $m_r = 119$, $\gamma = 1,82$.

Згідно з (Проект, 2022), водозбірна територія має 2,75 га ґрунтових поверхонь та 3,26 га газонів. За (ДБН, 2013) коефіцієнти стоку для поверхонь подібного типу дорівнюють відповідно 0,064 та 0,038.

Розрахунок коефіцієнта стоку за допомогою методу Хортон зроблено для двох варіантів набору параметрів (табл. 3).

Результат розрахунку середнього коефіцієнта стоку за період T за формулами (10) та (12) наведено в табл. 4.

Для розрахунку середнього коефіцієнта стоку за CN-методом першою підзадачею є визначення гідрологічної групи ґрунтів поверхні, яка розглядається. За результатами зіставлення опису ґрунтів у табл. 1 з описом водозбірної поверхні підприємства (Проект, 2022) зроблено висновок про належність ґрунтів до групи D. Згідно з табл. 2 вибрано: для твердих ґрунтових покриттів (ТГП) CN = 89, для газонів (з урахуванням асфальтових доріжок і невеликих будинків) CN = 82. Згідно з (16) та (17), коефіцієнт стоку дорівнює: для ТГП $\psi_{\text{ср}} = 0,287$, для газонів $\psi_{\text{ср}} = 0,116$.

У табл. 5 наведені результати розрахунку середньої витрати дощових вод за формулою (2) з коефіцієнтами стоку, отриманими різними методами.

Таблиця 3. Параметри моделі Хортон
Table 3. Horton Model Parameters

Варіант	Тип поверхні	Початкова інтенсивність інфільтрації f_0 , мм/год	Кінцева інтенсивність інфільтрації f_c , мм/год	Коефіцієнт затухання k , год ⁻¹	Джерело
1	ґрунтова	25,4	3,4	4	(Mays, 2001)
1	газони	76,2	4,74	4	(Rossman, 2007)
2	ґрунтова	50,8	3,4	4	(Rossman, 2007)
2	газони	84,6	4,74	4	(Rossman, 2007)

Таблиця 4. Результат розрахунку середнього коефіцієнта стоку за методом Хортон
Table 4. The result of calculating the average runoff coefficient according to the Horton method

Тип поверхні	Часу, з якого починається стік, год t^*		Середній коефіцієнт стоку $\psi_{\text{ср}}$	
	варіант 1	варіант 2	варіант 1	варіант 2
ґрунтова	0	0,10	0,559	0,222
газони	0,21	0,24	0,065	0,040

Таблиця 5. Результат розрахунку витрати дощових стічних вод з території підприємства ВП «Локомотивне депо» ім. Т. Г. Шевченка

Table 5. The result of the calculation of the flow rate of rain wastewaters from the territory of the enterprise OP “Locomotive Depot” named after T. G. Shevchenko

Метод розрахунку	Середньозважений (за площею) коефіцієнт стоку $\psi_{\text{ср}} P$	Витрата дощових СВ, л/с, q
ДБН В.2.5-75:2013	0,050	77,59
Хортон (1-й варіант)	0,291	451,56
Хортон (2-й варіант)	0,123	190,87
CN-метод	0,194	301,04

Як видно з табл. 5, результати розрахунку витрати дощових СВ різними методами суттєво відрізняються. Розрахунки з використанням моделі Хортон для обох наборів її параметрів відрізняються більш ніж у 2 рази. Але обидва розрахунки, а також розрахунок за CN-методом є одного порядку, а розрахунок за ДБН В.2.5-75:2013 суттєво відрізняється у бік меншої кількості дощових СВ. Це пояснюється неврахуванням динаміки водопроникності ґрунту.

Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Недолік розрахунку витрати дощових СВ згідно з ДБН В.2.5-75:2013 (методом, що рекомендований чинною методологією розрахунку ГДС) полягає в неврахуванні динаміки водопроникності ґрунту.

2. Недолік розрахунку витрати дощових СВ з використанням експоненціальної моделі інфільтрації Хортон полягає у невизначеності її параметрів. Для використання моделі в задачах розрахунку ГДС потрібно для всіх підприємств, що скидають дощові СВ у ВО, проводити дослідження властивостей водозбірної поверхні з метою ідентифікації параметрів моделі, що є практично неможливим.

3. У задачах розрахунку ГДС речовин оптимальним засобом врахування динаміки водопроникності ґрунту бачиться використання CN-методу. Для цього підприємства-водокористувачі повинні надавати розробнику нормативів ГДС докладнішу інформацію про характер водозбірної поверхні, яка б дала можливість ідентифікувати її у переліку типів поверхонь, що наведений Службою охорони природних ресурсів США. Така робота не пов'язана зі значними витратами коштів.

4. Реалізація пропозицій авторів після внесення відповідних корегувань у методичну базу розрахунків ГДС речовин підвищить рівень екологічної безпеки скидання дощових СВ з територій підприємств до ВО.

5. Напрямом подальших досліджень є розглядання аналогічної задачі при непостійній інтенсивності дощу.

Література

1. Основні методологічні проблеми нормування скидання забруднювальних речовин у водні об'єкти із зворотними водами / О. Прокурнін та ін. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. 2023. № 5. С. 37–43.

2. Ткачук С., Жук В. Регулювання дощового стоку в системах водовідведення : монографія. Львів : Львів. політехніка, 2012. 215 с.

3. Про затвердження Методичних рекомендацій з розроблення нормативів гранично допустимого скидання забруднювальних речовин у водні об'єкти із зворотними водами : наказ від 05.03.2021 № 173. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0173926-21#Text> (дата звернення: 23.08.2024).

4. Про затвердження Гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення : наказ від 02.04.2022 № 721 : станом на 13 січ. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text> (дата звернення: 21.08.2024).

5. ДБН В.2.5.75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 128 с.

6. ДСТУ 8691:2016. Стічні води. Настанови щодо встановлення технологічних нормативів відведення дощових стічних вод у водні об'єкти. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 28 с.

7. Жук В. М., Матлай І. І. Методи розрахунку об'єму дощового стоку. *Вісник національного університету "Львівська політехніка". "Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація"*. 2010. № 677. С. 32–38.

8. Zhuk V., Vovk L., Mysak P. Estimation of daily runoff coefficient of the pervious surfaces for the climate conditions of the city of Lviv. *Environmental Problems*. 2020. Vol. 5, № 3. P. 136–142.

9. Суліма Є. О. Використання рівняння Хортон в задачах розрахунку гранично допустимого скиду речовин з дощовим стоком. *Сталій розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* : матеріали IX Міжнар. молодіж. конгр., м. Львів, 28–29 берез. 2024 р. Київ, 2024. С. 75.

10. Horton, R. E., 1939. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity. *Trans. 441 Am. Geophys. Union*, 20 (4), 693–711.

11. Popov E. O priblizhenom raschete intensivnosti promachivaniya vody v pochvu. *Meteorologiya i gidrologiya*. 1952. № 2. P. 8–13.

12. Water infiltration in na Ultisol after cultivation of common bean. / M. Santos et al. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2014. Vol. 38. P. 1612–1620. URL: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500026>.

13. Mays L. Stormwater collection systems design handbook. McGraw-Hill Professional, 2001. 1008 p.

14. Urban Hydrology for Small Watersheds. TR-55. *United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service*, 1986. 164 p.

15. Santos T. E.M., Souza E. R., Montenegro A.A. A. Modeling of soil water infiltration with rainfall simulator in different agricultural systems. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* 2016. Vol. 20, no. 6. P. 513–518.

16. Investigation of infiltration in center pivot irrigation system / A. Amin Rostami et al. *Journal of Applied Hydrology*. 2014. Vol. 1, no. 1. P. 33–43.

17. Проект гранично-допустимого скидання (ГДС) забруднювальних речовин із зворотними водами ВП «Локомотивне депо» ім. Т. Г. Шевченка: звіт про НДР ТОВ «Науково технічний лабораторний центр «ТРИМ ЕКО». Черкаси, 2022. 82 с.

18. Rossman L. Storm Water Management Model. User's Manual, V. 5.0. EPA/600/R-05/040, 2007. 264 p.

References

1. Proskurnin, O., Hulenکو, O., Hromova, I., & Pechenyi, V. (2023), "Methodological problems of standardizing the discharge of pollutants in water facilities with return water", *Environmental safety and environmental protection technologies*, (5), 37–43.

2. Tkachuk, S., Zhuk, V. (2012), "Rain runoff regulation in drainage systems", Lviv: Lviv Polytechnic.

3. Ukraine. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine (2021), "On the approval of the Methodological Recommendations for the development of standards for the maximum permissible discharge of pollutants into water bodies with return waters", Order № 173 [online], March 5 [Date of appeal 23 August 2024]. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/en/v0173926-21?lang=en#Text>.

4. Ukraine. Ministry of health (2022), "On approval of hygienic standards of water quality of water bodies to meet drinking, household and other needs of the population", Order [online], May 2 [Date of appeal August 21 2024]. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text>.

5. Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine (2013), "Sewerage. External networks and structures. The main provisions of the design of DBN V.2.5.75:2013", Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine.

6. Scientific and research institution "Ukrainian Scientific and Research Institute of Environmental Problems" (2016), "Wastewater. Guidelines for establishing technological standards for the discharge

of rainwater into water bodies DSTU 8691:2016", Kyiv: State Enterprise "UkrNDNTs".

7. Zhuk, V.M., Matlay, I.I. (2010), "Methods for calculating the volume of rainwater runoff", *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic", "Heat Power Engineering. Environmental Engineering. Automation"*, (677), 32–38.

8. Zhuk, V., Vovk, L., Mysak, P. (2020), "Estimation of daily runoff coefficient of the pervious surfaces for the climate conditions of the city of Lviv", *Environmental Problems*, 5 (3), 136–142.

9. Sulima, E.O. (2024), "Using the Horton equation in problems of calculating the maximum permissible discharge of substances with stormwater runoff", In: *Sustainable development: environmental protection. Energy saving. Balanced nature management.*, March 28–29, 2024, Lviv, Ukraine, Kyiv: Yarochno Ya.V., p. 75.

10. Horton, R.E. (1939), "Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity", *Trans. 441 Am. Geophys. Union*, 20 (4), 693–711.

11. Popov, E. (1952), "O priblizhenom raschete intensivnosti promachivaniya vody v pochvu", *Meteorologiya i gidrologiya*, (2), 8–13.

12. Santos, M., Panachuki, E., Alves Sobrinho, T., Oliveira, P. & Rodrigues, D. (2014), "Water infiltration in na Ultisol after cultivation of common bean", *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online], 38, 1612–1620. DOI: 10.1590/S0100-06832014000500026.

13. Mays, L. (2001), "Stormwater collection systems design handbook", McGraw-Hill Professional.

14. Urban Hydrology for Small Watersheds. TR-55 (1986), United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service.

15. Santos, T. E.M., Souza, E. R., & Montenegro, A.A. A. (2016), "Modeling of soil water infiltration with rainfall simulator in different agricultural systems", *Rev. bras. eng. agric. ambient.*, 20 (6), 513–518.

16. Amin Rostami, A., Sadraddini, A.A., Nazemi, A., & Delir Hasannia, R. (2014), "Investigation of infiltration in center pivot irrigation system", *Journal of Applied Hydrology*, 1 (1), 33–43.

17. Project of maximum permissible discharge (MPD) of pollutants with return waters of the T.G. Shevchenko Locomotive Depot (2022), Research report, Cherkasy.

18. Rossman, L. (2007), "Storm Water Management Model. User's Manual", V. 5.0. EPA/600/R-05/040.

CONSIDERING INFILTRATION DYNAMICS IN THE PROBLEMS OF REGULATING THE DISCHARGE OF POLLUTANTS WITH SURFACE RUN

Proskurnin O.A., Zhuk V.M., Kyrpychova I.V., Sulima E.O., Tsapko N.S.

Proskurnin O.A., Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher, Scientific Research Institution "Ukrainian Research Institute of Environmental Problems", ORCID 0000-0001-9774-9306, proskurnin_o@ukr.net

Zhuk V.M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Hydraulic Engineering and Water Engineering, National University "Lviv Polytechnic", ORCID 0000-0002-2275-0799, zhuk_vm@ukr.net

Kyrpychova I.V., Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Horticulture and Ecology, Luhansk Taras Shevchenko National University, ORCID 0000-0003-4633-9379, kirinopsis@gmail.com

Sulima E.O., Postgraduate Student, Scientific Research Institution "Ukrainian Research Institute of Environmental Problems", ORCID 0000-0002-1006-3174, vcomfy1456@gmail.com

Tsapko N.S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, First Deputy Director, Scientific Research Institution "Ukrainian Scientific Research Institute of Environmental Problems", ORCID 0000-0003-2480-3636, tsapkonatali@gmail.com

The article is devoted to the problem of calculating the volume of rainwater runoff from permeable surfaces in the task of limitation pollutant discharges into water bodies. The problem with the existing limitation methodology is that the calculation does not take into account the dynamics of changes in soil impermeability. The article considers different mathematical models of rainwater infiltration into the soil of the earth's surface. It is noted that some infiltration models described in the literature have not been sufficiently tested and for this reason are not recommended for use in task of limitation pollutant discharges with wastewater. Also, according to the authors, a number of existing methods for calculating rainwater flow are inappropriate in these problems due to high computational complexity. The article pays attention to the Horton exponential infiltration model, widely presented in the scientific literature, and the calculation of the amount of rainwater runoff using the CN method. When using the Horton model, it is necessary to take into account the initial delay in rainwater runoff caused by two factors: possible high initial infiltration and filling of depressions on the surface with water. The formula for calculating the initial time delay of rainwater runoff is derived. It is noted that the problem of using the Horton model is the uncertainty of its parameters. This circumstance prevents its use in the task of rationing pollutant discharges with rainwater runoff, since this will require all water-using enterprises to conduct labor-intensive and costly studies of soil properties in the catchment area. The article provides a demonstration calculation of rainwater runoff flow using different methods using the example of the catchment area of the locomotive depot named after T.G. Shevchenko (Smela, Cherkasy region). Attention is drawn to the significant difference in the results of calculations using different methods. The authors conclude in favor of using the CN-method in the task of rationing discharges, which indirectly takes into account the dynamics of soil impermeability. The implementation of this proposal will require, firstly, changes to the existing methodological base for calculating maximum permissible discharges of substances into water bodies, and secondly, identification of the watershed surface of enterprises in accordance with the classification of the US Natural Resources Conservation Service.

Key words: limited discharge, wastewater, rainwater, infiltration, runoff coefficient.