

УДК 628.4

**Roman O. Hlushchenko**, Post-Graduate

ORCID ID: 0000-0003-2863-1480 *e-mail*: gr2017inc@gmail.com

**Tetiana M. Tkachenko**, Dr Hab., Professor, Senior Researcher, Head of the Department of Labour and Environment Protection

ORCID ID: 0000-0003-2105-5951 *e-mail*: tkachenkoknuba@gmail.com

**Viktor O. Mileikovskiy**, Dr Hab., Professor, Senior Researcher, Professor of Heat-Gas Supply and Ventilation Department

ORCID ID: 0000-0003-2105-5951 *e-mail*: v\_mil@ukr.net

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

## **EFFECTIVE DRAINAGE OF RAINWATER FROM ROADS BY RAIN GARDEN-STRIPS IN THE CONCEPT OF THE CITY-SPONGE**

***Abstract.** Today there is a problem of flooding of urban areas with rainwater and their slow drainage to rainwater sewage and further to the distribution collectors. There are several ways to ensure the resilience of urban areas to heavy rains and downpours. One of the current methods is "green" roofs (horizontal or sloping) with green plantings, which is capable to absorb water. A certain amount of water is absorbed by the plants, its certain amount remains in the substratum, and the rest is filtered by several layers of the structure under the plants, which throttles the movement of it to the storm-water sewage. The second method is to collect rainwater in special storage tanks, which are located on the roof or near to the building or in the soil structure in the yard. The accumulated water is used for household needs: watering lawns, washing, flushing toilets, washing floors, cleaning pavements, etc. The third method is to absorb water and drain it by natural biological terrestrial sponge facilities: permeable surfaces, sloping terrain, natural vegetation, green structures, rain gardens, etc. These correspond to the modern concept of "sponge city". The authors propose a method of rapid drainage of rainwater using special "green structures" – rain-garden bands along the roadways. The ability to capture water by rain-garden bands has been confirmed on the example of most of the regional centres of Ukraine in case of the strongest observed precipitation. Such rapid drainage becomes especially important in the transition from cities for cars to cities for bicycles. This increases the requirements to avoid slippery roads for increasing the stability of these vehicles. In addition, the proposed rain gardens with shrubs can perform safe protective functions by extinguishing the kinetic energy of bouncing cars during a road accident.*

***Key words:** urbanization; urbocenosis; technogenic load; green construction; green structures; rain gardens; rain-gardens bands; sponge city*

© P.O. Глущенко, Т.М. Ткаченко, В.О. Мілейковський, 2021

Р.О. Глущенко, Т.М. Ткаченко, В.О. Мілейковський

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

## ЕФЕКТИВНЕ ВІДВЕДЕННЯ ДОЩОВОЇ ВОДИ З ДОРІГ ДОЩОВИМИ САДАМИ-СМУГАМИ У КОНЦЕПЦІЇ МІСТА-ГУБКИ

***Анотація.** На сьогодні існує проблема затоплення міських територій дощовими водами та повільне відведення їх до дощової каналізації і далі до розподільчих колекторів. Існує декілька напрямів забезпечення стійкості міських територій до сильних злив та дощів. Один із актуальних методів – це “зелені” покрівлі (горизонтальні або похилі) з зеленими насадженнями, які здатні поглинати воду. Певна кількість води вбирається рослинами, ще певна її кількість залишається в субстраті, а інша частина фільтрується за рахунок декількох шарів конструкції під рослинами, що уповільнює її рух до систем дощової каналізації. Другий метод полягає в збиранні дощової води в спеціальні накопичувальні баки, які знаходяться на покрівлі або біля будинку, або в конструкції ґрунту на прибудинковій території. Накопичену воду використовують для побутових потреб: полив газонів, прання, змивання туалетів, миття підлог, очищення тротуарів тощо. Третій метод полягає в поглинанні води та її відведенні природними біологічними наземними засобами-губками: водопроникні поверхні, рельєф з ухилом, природне рослинне покриття, зелені конструкції, дощові сади тощо. Це відповідає сучасній концепції “місто-губка”. Автори пропонують метод швидкого відведення дощової води з доріг спеціальними «зеленими конструкціями» – дощовими садами-смугами уздовж проїзних частин. Підтверджено здатність захоплювати воду дощовими садами-смугами на прикладі більшості обласних центрів України на випадок найсильніших спостережених опадів. Таке швидке відведення води стає особливо актуальним при переході від міст для автомобілів до міст для велосипедів. При цьому посилюються вимоги до уникнення слизьких доріг задля підвищення стійкості цих транспортних засобів. Крім того, пропонувані дощові сади-смуги з кущами можуть виконувати безпекові захисні функції шляхом гасіння кінетичної енергії автомобілів, що відскакують, під час ДТП.*

***Ключові слова:** урбанізація; урбоценоз; техногенне навантаження; «зелене будівництво»; «зелені конструкції»; дощові сади; дощові сади-смуги; місто-губка*

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.46-59>

### Вступ

Затоплення вулиць у містах – явище, яке часто спостерігається не тільки в Україні, а й у багатьох інших країнах світу. Причинами є:

- старі мережі дощової каналізації, які робилися ще 50...100 років тому;
- невідповідність чинних норм поточним кліматичним змінам у частині опадів;
- стрімке розростання міст, що призводить до скорочення площ зелених зон і збільшення кількості бетонних та асфальтових покриттів, нездатних вбирати воду;
- висока вартість і тривалість реконструкції зливової каналізації під сучасні обсяги опадів;
- несвоєчасне та недостатнє очищення мереж від засмічення;

- відсутність політики або стратегії на рівні міст щодо вирішення даного питання;
- неправильний підхід до інфраструктури, який не враховує сучасні обсяги опадів і передбачає стік води лише на проїзну частину та в зливову каналізацію з ігноруванням природних рішень – різних типів озеленення.

У рамках сталого розвитку міста необхідне розроблення заходів щодо забезпечення екологічної безпеки й санітарії, енергоефективності та ресурсозбереження, збереження й відновлення природного середовища, а також екологізації будівництва та виховання екологічної свідомості міських жителів.

Рясні опади можуть призвести до короткочасного перевантаження міської дощової каналізації. Великою перевагою “зелених покрівель” є накопичення вологи, що дозволяє відстрочити стік зливової води й розвантажити дощову каналізацію задля попередження затоплення.

Пропонуємо триступеневу схему управління дощовими стоками для зменшення навантаження на місцеву дощову каналізацію та використання дощової води як цінного ресурсу:

- використання “зелених покрівель”;
- встановлення спеціальних накопичувальних баків;
- передбачення наземних засобів-губок, що поглинають дощову воду, зокрема будівництво дощових садів-смуг уздовж проїжджих частин, які розробляють автори даної роботи.

Така схема дозволить максимально використати можливості управління стічними водами міст.

## Літературний огляд

Сучасна методика озеленення дахів з використанням спеціальних шарів для висаджування рослинності, захисту від коріння, дренажу тощо з’явилася відносно нещодавно. Але історія виникнення “зелених покрівель” ведеться здавна. Прикладами є покриті дерном берестяні дахи в середньовічній Скандинавії та Ісландії, висячі сади Вавилону, терасовий сад на острові Белла (XVII століття) тощо [1].

У XIX ст. Карл Рабітц [1] знову відродив попит на “зелені покрівлі”. Зараз ці “зелені конструкції” розглядаються як значуща складова зеленого будівництва та сталого розвитку урбоценозів. У багатьох країнах світу “зелені конструкції” розглядаються як перспективна прогресивна технологія захисту довкілля [2–10]. При цьому зазначаються різноманітні аспекти покращення навколишнього середовища, зокрема зменшення рівня  $CO_2$  та забруднень, продукування кисню, глюкози, регулювання температури повітря, зниження шуму, накопичення й зберігання води, захист від бруду, пилу, мікроорганізмів та зменшення енергопотреб будівлі.

Одним з найбільш перспективних напрямків є використання “зелених конструкцій” для управління кількісними та якісними показниками дощових стічних вод [3–6, 11–12]. На сьогодні відведення цих вод у містах тільки інженерними методами вважається неперспективним:

- системи дощової каналізації забиті сміттям і не чистяться;
- обладнання цих систем застаріло;
- у містах утворено багато бетонних та асфальтових поверхонь, які не вбирають воду.

Усі ці фактори призвели до створення нових концепцій управління дощовими потоками в містах. Найбільш відома концепція “міста-губки” [13]. Термін “місто-губка” ввів у 2005 році індійський автор Ван Ройджен, але концепція була офіційно прийнята в Китаї у 2013 році. Китай є лідером у впровадженні таких міст і має державну програму “Концепція міста-губки”. Детальний аналіз міст проведено в роботі [13]. Автори запропонували концепцію дизайну й виконали розрахунки надходження дощової води  $V_d$  [м<sup>3</sup>] та її утримання  $V_s$  [м<sup>3</sup>] різними «зеленими» елементами міста Сучжоу.

Автори не вказали висоту  $WRh_B$  [м] води, яку може поглинати під час дощу кожна губка. Ця відсутня інформація є найважливішою для розрахунків необхідних площ відповідних губчастих конструкцій. Під час опадів висихання в товщі цих конструкцій незначне. Це значення є властивістю лише структури відповідної губки. Воно повинно бути незалежним від місця розташування для більшості міст світу. Тому дані роботи [13] можна використовувати для інших регіонів.

На “зелених” покрівлях без нахилу виникає застій води [15]. Правильне проектування такої “зеленої” покрівлі дозволяє уникнути застійних явищ. Збільшення висоти дренажних елементів (рис. 1) підвищує до необхідного значення відстань до стоячої води. При цьому висота конструкції дещо зростає, але не збільшується вага [15]. Адже елементи з переробленої жорсткої піни є легкими. Покрівля складається з:

- захисту від проростання коріння 1, що вкладається безпосередньо на шар гідроізоляції та забезпечує його захист від пошкодження корінням рослинного шару;
- вологоутримувального захисного мату 2, що забезпечує захист гідроізоляції від можливих механічних пошкоджень і відіграє роль акумулятора додаткової вологи;
- дренажно-накопичувального елемента, який накопичує оптимальну кількість вологи, необхідної для забезпечення життєдіяльності рослин, і регулює відтік води;
- системний фільтр забезпечує фільтрацію води для запобігання потраплянню дрібнодисперсних часток субстрату в дренажно-накопичувальний елемент задля захисту його від заливання;
- шару субстрату, у який висаджують рослини;
- рослинного шару (седуми, газон, багаторічні рослини, дрібний чагарник, дерева).



Рис. 1 – Покрівля без нахилу: 1 – захист від проростання коріння; 2 – вологоутримувальний захисний мат; 3 – дренажно-накопичувальний елемент; 4 – системний фільтр; 5 – шар субстрату; 6 – рослинний шар

Висота такої системи ZnCo [15] становить біля 180 мм, вага наближається до  $108 \text{ кг/м}^2$ , і при цьому водонакопичення досягає  $36 \text{ дм}^3/\text{м}^2$ , а співвідношення стоку  $C \approx 0,34$ .

З використанням системи для похилих покрівель можливе озеленення дахів з нахилом до  $35^\circ$  [16]. Георешітка має елементи розмірами  $540 \times 540 \text{ мм}$  заввишки 100 мм. Її виготовлено з поліетилену високого тиску. Її елементи легко збираються з утворенням стабільного й рівного з'єднання. Георешітка готова для заповнення субстратом і залишає достатню площу для розвитку кореневої системи. Дощова вода стікає набагато швидше порівняно з плоскими покрівлями. Рекомендовано передбачити зрошення задля уникнення пересихання субстрату, особливо в посушливий час.

Конструкцію озеленення похилих дахів необхідно розрахувати так, щоб сили зсуву були компенсовані стабільним окантуванням схилу. За необхідності слід встановити додаткові бруси. Висота системи [16] становить біля 120 мм, вага наближається до  $155 \text{ кг/м}^2$ , а водонакопичення становить близько  $64 \text{ дм}^3/\text{м}^2$ .

Другим етапом управління дощовими стоками є системи затримання дощової води. Такі системи (рис. 2) використовуються на “зелених покрівлях” будь-якого типу [17] і накопичують до  $80 \text{ дм}^3/\text{м}^2$  опадів. Потім вода повільно вивільнюється (червона стрілка) до системи водовідведення.

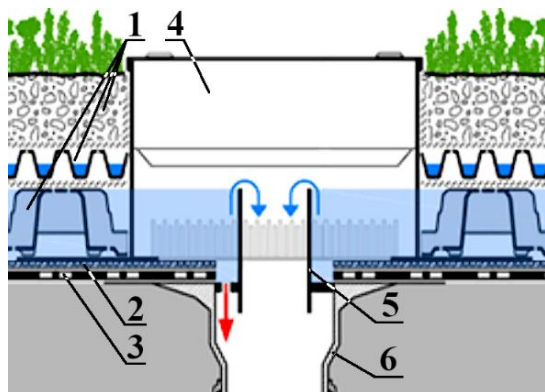


Рис. 2 – Система збору дощової води ZnCo [17]:

1 – стандартні шари “зеленої покрівлі”; 2 – системний фільтр; 3 – захист від проростання коріння; 4 – бак; 5 – переливна система; 6 – труба системи водовідведення або побутового водопостачання

Для використання накопиченої води вона має зберігатися в накопичувальних баках [18]. Така техніка є стародавньою і використовувалася в основному в посушливих районах, де дощова вода має особливу цінність. Зокрема, з цією метою цистерни в підлогах будівель будувалися в неолітичних селищах Леванту (східна частина Середземного моря), наприклад, у Рамади та Лебве [19]. Сучасні баки задля заощадження земельних площ доцільно встановлювати на дахах (рис. 3).

Під час опадів вода надходить до накопичувальних баків. Баки заповнюються дощовою водою зі швидкістю, яка залежить від кількості опадів. Якщо баки заповнюються, дощові води надходять до стаціонарної системи зливостоків будівлі, а звідти – до міської дощової каналізації.

Після потрапляння дощових вод до баків її можливо використовувати для побутових потреб: полив газонів, прання, змивання туалетів, миття підлог, очищення тротуарів тощо. Для будівель, у яких неможливо розташувати накопичувальні баки безпосередньо на покрівлі, їх краще розташувати [18] на землі біля фундаменту будівлі або в конструкції ґрунту (рис. 4).

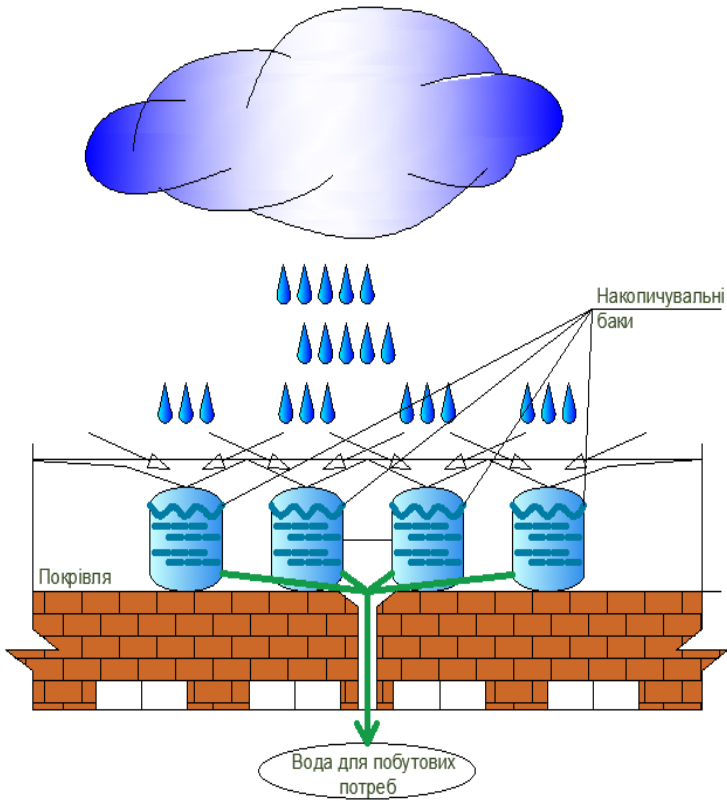


Рис. 3 – Схема розташування накопичувальних баків на покрівлі

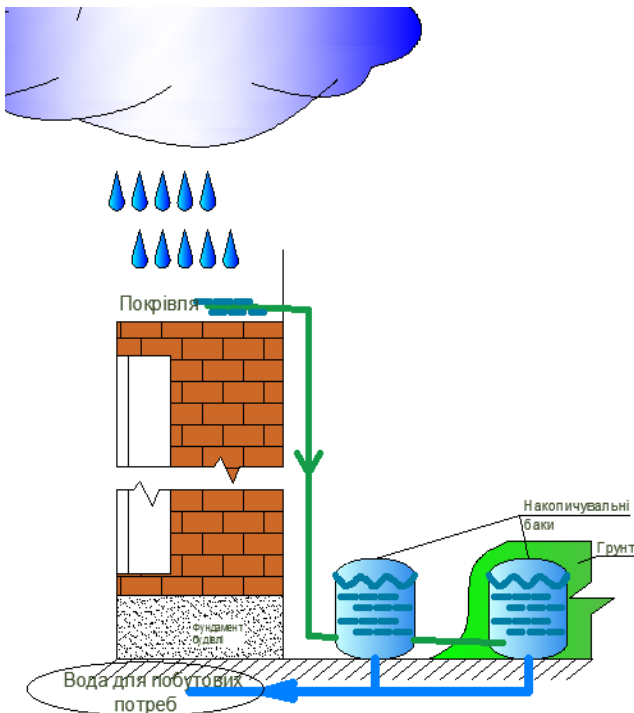


Рис. 4 – Схема розташування накопичувальних водних баків біля цокольного поверху

Об'єм води в баках залежить від кількості опадів, об'єму та кількості самих баків. Воду слід використати протягом 10...20 діб [18]. У ній відбуваються біохімічні процеси з погіршенням її якості. Для проєктування накопичувальних баків рекомендується методика, розроблена Тетяною Ткаченко [20] на базі методики Wilo [18], адаптованої до умов України.

Третім етапом управління дощовими стоками є наземні засоби-губки [21] – водонепроникні покриття, дощові сади тощо. Якщо перші лише пропускають воду (висота утримуваної води  $WRh_B = 0$ ), то другі здатні її утримувати. У зазначеній роботі відсутнє значення висоти утримуваної води. Однак, наведені в ній дані дозволили авторам цієї роботи розрахувати цю висоту, а саме 550 мм ( $WRh_B = 0,55$  м).

## Основна частина

Авторами цієї роботи запропоновано використовувати особливий вид “зеленої конструкції” – дощові сади-смуги (рис. 5) уздовж дороги біля її проїзної частини. Смуги призначено для захоплення води з обох боків. Усі частини дороги можуть бути приблизно на одному рівні з ухилом до смуг. При цьому останні можуть мати відбійники для гасіння енергії автомобіля під час ДТП. Однак, рекомендовано замість цього щільно висадити кущі.

Основні переваги кущів перед відбійниками:

- гасіння енергії автомобіля без додаткового відскоку;
- привабливий зовнішній вигляд;
- секвестрація  $CO_2$  та утворення кисню.

Недоліки:

- більше займаного місця;
- потреба періодичного підрізання;
- пошкодження кущів під час дорожньо-транспортних пригод, що потребує додаткового обслуговування;
- додаткові стовпчики зі світловідбивними мітками для нічного руху.

Розрахунок сумарної ширини смуг виконується за умови, щоб усю дощову воду найбільш інтенсивного дощу заввишки  $RFh_{max}$ , м, яка потрапила на проїзну частину, тротуари та дощові сади-смуги, було утримано цими смугами.

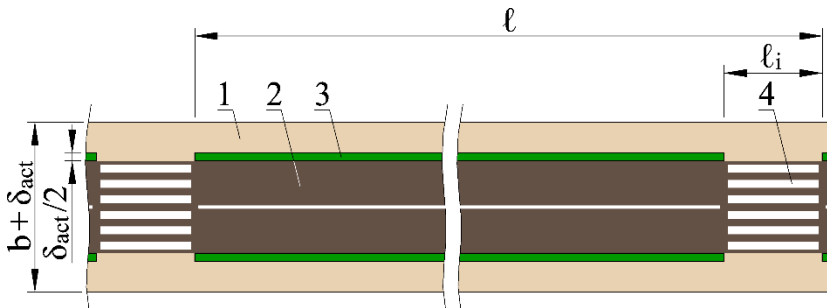


Рис. 5 – Пропоноване рішення вулиці: 1 – тротуар; 2 – проїзна частина; 3 – дощові сади-смуги; 4 – пішохідний перехід

При сумарній ширині основних частин (проїзна частина та тротуари) дороги  $b$ , м, та середній відносній довжині пропусків дощових садів-смуг на одиницю довжини дороги  $\ell_i/\ell$ , відносна сумарна ширина дощових садів-смуг

$$\frac{\delta_{act}}{b} = \frac{RFh_{max}}{(WRh_B - RFh_{max}) \left(1 - \frac{\ell_i}{\ell}\right)} \quad (1)$$

Основною проблемою розрахунку за формулою (1) стала обмеженість даних архівів погоди щодо опадів. Тому було застосовано міжнародну систему Copernicus Climate Change Service (C3S), реалізовану Європейським центром середньострокових прогнозів погоди (ECMWF).

У рамках міжнародного освітнього проекту Erasmus+ ClimEd (реєстраційний номер 619285-EPP-1-2020-1-FI-EPPKA2-SVHE-JP), до якого долучений Київський національний університет будівництва і архітектури, співробітники кафедри охорони праці та навколишнього середовища (зокрема авторка даної роботи Тетяна Ткаченко) пройшли навчання роботі у цій системі. Вона дозволяє виконувати найрізноманітніші операції з погодними даними з різних спеціалізованих баз даних мовою Python.

Пошук та аналіз наявних баз даних показав, що для даної задачі найбільш компактною та зручною буде база “Extreme precipitation risk indicators for Europe and European cities from 1950 to 2019” (Показники екстремального ризику опадів для Європи та європейських міст з 1950 по 2019 рік). Недоліком цієї бази є брак доступу в межах певних широт і довгот. Доводиться запитувати дані за всією Європою. Однак, наявність змінної “Maximum 1-day precipitation” (Максимальна кількість опадів за 1 добу) значно спрощує розрахунки.

Створено додаток (рис. 6) “Rain-Garden Bands” (Дощові сади-смуги), який

- отримує дані про денні опади за 2000...2019 роки;
- інтерполює їх для конкретного міста;
- обирає максимум;
- розраховує відсоток ширини дощового саду-смуги.

Розрахунок виконано для обласних центрів України, крім Одеси, для якої даних у базі не виявлено. Дані табл. 1 дозволяють швидко розрахувати ширину дощових садів-смуг. Як бачимо, на більшості території України використання цього рішення не призведе до суттєвого розширення доріг, натомість дасть можливість уловлювати всю дощову воду без потреби відновлення інженерних систем природним способом. Лише Івано-Франківськ, Кропивницький та Чернівці мають підвищену потребу у збільшенні ширини доріг. На дорогах цих міст, можливо, доведеться частково використовувати інженерні системи.

Отже, технологія дощових садів-смуг дозволяє ефективно вирішувати проблеми затоплення доріг у рамках концепції міста-губки. Ця технологія дозволяє максимально швидко поглинути воду якомога ближче до місця її потрапляння на поверхню проїзної частини та тротуарів.



The screenshot displays the OpenMeteo toolbox editor interface. The top navigation bar includes the OpenMeteo logo, ECMWF logo, and Climate Change Service logo, along with the user name 'Tetiana Tkachenko' and a 'Logout' button. The main content area is divided into three panels: a left sidebar with 'Applications', 'Data', and 'Documentation' tabs; a central code editor showing a Jupyter Notebook with Python code for calculating rain-garden bands; and a right sidebar with a 'Rain-Garden Bands Calculation' panel containing a download link, a city selection dropdown (set to 'Kyiv (UA)'), and a text input field for the relation  $l/l$  (set to 0).

```
1 # EN #####
2 # APPLICATION FOR CALCULATION OF #
3 # RELATIVE WIDTH OF RAIN-GARDEN BANDS ON ROADS #
4 #
5 # DEVELOPED BY: #
6 # Tetiana TKACHENKO, Dr hab, prof., #
7 # Viktor MILEJKOVSKIY, Dr hab, prof. #
8 # Roman HLUSHCHENKO, post-graduate #
9 # Kyiv National University #
10 # of Construction and Architecture #
11 #####
12 # UA #####
13 # ЗАСТОСУНОК ДЛЯ РОЗРАХУНКУ #
14 # ВІДНОСНУ ШИРИНУ ДОЩОВИХ САДІВ-СМУГ ДОРИГ #
15 #
16 # РОЗРОБНИКИ: #
17 # Тетяна ТКАЧЕНКО, д.т.н., проф., #
18 # Віктор МІЛЕЖКОВСЬКИЙ, д.т.н., проф. #
19 # Роман ГЛУШЕНКО, аспірант #
20 # Київський національний університет #
21 # будівництва і архітектури #
22 #####
23 #Importing CDS Toolbox library
24 #Імпорту бібліотеки інструментів CDS Toolbox
25 import cdstoolbox as ct
26
27
28 #Defining the application
29 #Визначення застосунку
30 @ct.application(title='Rain-Garden Bands Calculation')
31
32 #Defining an input of the calculation city
33 #Визначення вводу розрахункового міста
34 @ct.input.city('CityToCalc', label='City',
35 description='Місто')
36
37 #Defining an input of the relative breaks width
38 #Визначення вводу відносної ширини пропусків
39 @ct.input.text('Rel',
40 label='The relation  $l/l$  between crossing breaks  $l_i$ 
41 [m] and distance between crossings  $l$  [m]',
42 description='Відношення  $l_i/l$  між розривами на
43 переходах  $l_i$  [m] та відстанню між переходами  $l$  [m]',
44 default='0')
45
46 #Defining the output - download result link
47 #Визначення виводу - посилання на завантаження результатів
48 @ct.output.download()
49
50 #The main function:
51 # - retrieves the data about daily precipitation;
52 # - interpolating for the city;
53 # - selecting the maximum;
54 # - calculating the percentage of width of rain-garden bands.
55 # Головна функція:
56 # - отримує дані про денні опади;
57 # - інтерполює їх для конкретного міста;
58 # - обирає максимум
59 # - розраховує відсоток ширини дощового саду-смуги.
60 def main(CityToCalc, Rel):
61 #Converting the relative breaks to floating-point number
62 #Перетворення відносних пропусків на число
63 RL=float(Rel)
64 #Height of water receiving capacity of rain-garden bands
65 #Висота води, що може утримуватися дощо-садовими садами
66 WRh_B=0.55
67 #Retrieving precipitations data
68 #Отримуємо дані щодо опадів
69 print('Retrieving the data')
70 data = ct.catalogue.retrieve(
71 {'variable': 'maximum_1_day_precipitation',
72 'product_type': 'era5',
73 'period': [
74 '2000', '2001', '2002', '2003', '2004',
75 '2005', '2006', '2007', '2008', '2009',
76 '2010', '2011', '2012', '2013', '2014',
77 '2015', '2016', '2017', '2018', '2019'],
78 'temporal_aggregation': 'yearly',
79 'spatial_coverage': 'europe'})
80 #Getting the data for the city
81 #Отримання даних для міста
82 CityData=ct.cube.interpolate(data,
83 lon=CityToCalc.get('lon'),
84 lat=CityToCalc.get('lat'), method = 'linear')
85 print('Processing the data')
86 #The maximum daily precipitation
87 #Максимальні добові опади
88 RFh_max = ct.cube.max(CityData, dim='time')
89 #Percent of width of the rain-garden bands
90 #Відсоток ширини дощо-садових смуг
91 Percent=ct.cds.update_attributes(Percent, attrs={'units': '%',
92 'long_name': 'Percent of width of rain-garden bands'})
93 return Percent
```

Рис. 6 – Застосунок для розрахунку відносної ширини дощових садів-смуг

Таблиця 1 – Відсоток ширини дощових садів-смуг від ширини основних частин дороги

Місто	Відносна сумарна ширина дощових садів-смуг, %, при відносних пропусках, %															
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Вінниця	10,3	10,5	10,7	10,9	11,2	11,4	11,7	11,9	12,2	12,5	12,8	13,2	13,5	13,9	14,3	14,7
Дніпро	11,7	12,0	12,2	12,5	12,7	13,0	13,3	13,6	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,3	16,7
Донецьк	11,0	11,2	11,4	11,7	11,9	12,2	12,5	12,8	13,1	13,4	13,7	14,1	14,4	14,8	15,2	15,7
Івано-Франківськ	14,0	14,3	14,6	14,9	15,3	15,6	16,0	16,3	16,7	17,1	17,6	18,0	18,5	19,0	19,5	20,1
Київ	10,6	10,8	11,0	11,2	11,5	11,7	12,0	12,3	12,6	12,9	13,2	13,5	13,9	14,3	14,7	15,1
Кропивницький	12,5	12,7	13,0	13,3	13,6	13,9	14,2	14,5	14,8	15,2	15,6	16,0	16,4	16,9	17,3	17,81
Луганськ	9,2	9,38	9,6	9,77	10,0	10,2	10,4	10,7	10,9	11,2	11,5	11,8	12,1	12,4	12,8	13,1
Луцьк	9,3	9,47	9,7	9,87	10,1	10,3	10,5	10,8	11,1	11,3	11,6	11,9	12,2	12,5	12,9	13,3
Львів	10,6	10,8	11,0	11,3	11,5	11,8	12,0	12,3	12,6	12,9	13,3	13,6	13,9	14,3	14,7	15,1
Миколаїв	10,3	10,5	10,8	11,0	11,2	11,5	11,7	12,0	12,3	12,6	12,9	13,2	13,6	14,0	14,3	14,7
Полтава	8,84	9,02	9,21	9,4	9,61	9,82	10,0	10,3	10,5	10,8	11,1	11,3	11,6	12,0	12,3	12,6
Рівне	13,1	13,3	13,6	13,9	14,2	14,5	14,8	15,2	15,5	15,9	16,3	16,7	17,2	17,6	18,1	18,6
Сімферополь	8,11	8,27	8,45	8,63	8,81	9,01	9,21	9,43	9,7	9,89	10,1	10,4	10,7	11,0	11,3	11,6
Суми	9,00	9,18	9,37	9,57	9,78	10,0	10,2	10,5	10,7	11,0	11,3	11,5	11,8	12,2	12,5	12,9
Тернопіль	9,61	9,80	10,0	10,2	10,4	10,7	10,9	11,2	11,4	11,7	12,0	12,3	12,6	13,0	13,3	13,7
Ужгород	9,13	9,31	9,51	9,71	9,92	10,1	10,4	10,6	10,9	11,1	11,4	11,7	12,0	12,3	12,7	13,0
Харків	7,38	7,53	7,69	7,85	8,02	8,20	8,39	8,58	8,8	9,00	9,22	9,46	9,7	9,97	10,3	10,5
Херсон	8,03	8,20	8,37	8,55	8,73	8,93	9,13	9,34	9,6	9,80	10,1	10,3	10,6	10,9	11,2	11,5
Хмельницький	10,0	10,2	10,4	10,7	10,9	11,1	11,4	11,7	11,9	12,2	12,5	12,9	13,2	13,5	13,9	14,3
Черкаси	9,7	9,9	10,1	10,3	10,6	10,8	11,1	11,3	11,6	11,9	12,2	12,5	12,8	13,1	13,5	13,9
Чернівці	19,4	19,8	20,2	20,6	21,1	21,6	22,1	22,6	23,1	23,7	24,3	24,9	25,5	26,2	27,0	27,7
Чернігів	11,0	11,2	11,4	11,7	11,9	12,2	12,4	12,7	13,0	13,4	13,7	14,0	14,4	14,8	15,2	15,6

Основною транспортною проблемою провідних міст світу, зокрема Києва, є забруднення повітря й тиснява на дорогах через велику завантаженість автомобілями. Як показала практика, створення ефективних розв'язок та перенесення всього громадського транспорту під землю (м. Париж, Франція) вирішують проблему лише частково. Тому на сьогодні найбільш ефективним та екологічним рішенням є відмова від “міста для автомобілів” та перехід на концепцію “міста для велосипедів”. При цьому підвищуються вимоги до уникнення слизькості доріг задля стійкості цих транспортних засобів. Саме дощові сади-смуги дозволяють найбільш ефективно вирішити цю проблему. Під час злив вода буде швидко залишати проїзну частину (та велосипедні смуги). Це дозволить не лише покращити зчеплення шин транспортних засобів з покриттям дороги, але й мінімізувати утворення бризок при їзді як велосипедів, так і автомобілів, що їдуть поруч.

## Висновки

Для уникнення затоплення міст ефективним підходом є перехід від інженерних методів водовідведення до концепції міста-губки. При цьому рекомендується триступеневе управління дощовими стоками: затримання води “зеленими покрівлями”, збирання води у накопичувальних баках та наземні засоби-губки. Накопичувальні баки дозволяють використовувати отриману воду для побутових потреб, особливо якщо ця вода профільтована в товщі “зелених покрівель”. Це зменшує потребу міста в питній воді та використовує дощові води як цінний природний ресурс. Для доріг запропоновано особливий тип “зелених конструкцій” – дощові сади-смуги з обох боків кожної проїзної частини. Вони є біотехнічним заходом для затримання води, очищення її, безпеки руху, декорування тощо. У результаті розрахунків дощових садів-смуг отримано довідкові дані, які дозволяють проектувати ці засоби в різних регіонах України. Показано, що для більшості території України цих засобів достатньо для забезпечення повного відведення дощової води за найсильнішої зливи. Подальші дослідження стосуватимуться ефективності фільтрації води різними “зеленими конструкціями”.



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



Публікація підготовлена в рамках проекту «Багаторівнева місцева, національна та загальнорегіональна освіта та навчання в галузі кліматичних послуг, адаптації та пом'якшення наслідків зміни клімату 619285-ERP-1-2020-1-FI-ERPKA2-SVNE-JP». Підтримка Європейською комісією випуску цієї публікації не означає схвалення змісту, який відображає лише думки авторів, і Комісія не може нести відповідальність за будь-яке використання інформації, що міститься в ній.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Плоский В. О. Моделювання термічного опору трав'яного шару зеленої покрівлі / В. О. Плоский, Т. М. Ткаченко, В. О. Мілейковський, В. Г. Дзюбенко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. – 2016. – № 844. – С. 158–163.
2. Пінь А. М. Адаптація «зелених» технологій у концепцію розумного міста / А. М. Пінь. – Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України: 36. наук. праць. – 2018. – Вип. 5(133). – С. 76–82. – URL: [http://ird.gov.ua/sep/sep20185\(133\)/sep20185\(133\)\\_076\\_PinAM.pdf](http://ird.gov.ua/sep/sep20185(133)/sep20185(133)_076_PinAM.pdf)
3. Gioannini R. Plant Communities Suitable for Green Roofs in Arid Regions / R. Gioannini, M. Al-Ajlouni, R. Kile, D. VanLeeuwen, R. St. Hilaire // Sustainability. – 2018. – Vol. 10. – Iss. 6. – ArticleID: 1755. – <https://doi.org/10.3390/su10061755>
4. Rey C. V. Green Roof Design with Engineered Extensive Substrates and Native Species to Evaluate Stormwater Runoff and Plant Establishment in a Neotropical Mountain / C. V. Rey, N. Franco, G. Peyre, J. P. Rodriguez // Sustainability. – 2020. – Vol. 12. – Iss. 16. – Article ID 6534. <https://doi.org/10.3390/su12166534>

5. Jiajun Zeng. First flush of non-point source pollution and hydrological effects of LID in a Guangzhou community / Jiajun Zeng, Guoru Huang, Haiwan Luo, Yepeng Mai, Haichun Wu. – Scientific Reports. – 2019. – Iss. 9. – Article No: 13865. – <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50467-8>
6. Haoming Chen. Effects of Biochar and Sludge on Carbon Storage of Urban Green Roofs / Haoming Chen, Jinyi Ma, Xinjun Wang, Pingping Xu, Shuo Zheng, Yanwen Zhao // *Forests*. – 2018. – Vol. 9. – Iss. 7. – Article ID 413. – <https://doi.org/10.3390/f9070413>
7. Zluwa I., Pitha U. The Combination of Building Greenery and Photovoltaic Energy Production – A Discussion of Challenges and Opportunities in Design / I. Zluwa, U. Pitha // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13. – Iss. 3. – Article ID 1537. – <https://doi.org/10.3390/su13031537>
8. Yaping Chen. Numerical Simulation of Local Climate Zone Cooling Achieved through Modification of Trees, Albedo and Green Roofs – A Case Study of Changsha, China / Yaping Chen, Bohong Zheng, Yinze Hu // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12. – Iss. 7. – Article ID 2752. – <https://doi.org/10.3390/su12072752>
9. Gill A. S. Microbial Composition and Functional Diversity Differ Across Urban Green Infrastructure Types / A. S. Gill, K. Purnell, M. I. Palmer, J. Stein, K. L. McGuire // *Frontiers in Microbiology*. – 2020. – Vol. 11 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00912>
10. Bandehali B. Current State of Indoor Air Phytoremediation Using Potted Plants and Green Walls / B. Bandehali, T. Miri, H. Onyeaka, P. Kumar // *Atmosphere*. – 2021. – Vol. 12. – Iss. 4. – Article ID 473. – <https://doi.org/10.3390/atmos12040473>
11. Ткаченко Т.М. Использование зелёных кровель в регулировании дождевых стоков / Т.Н. Ткаченко, Т.В. Листрова // *Актуальные научно-технические и экологические проблемы мелиорации земель: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию мелиоративного образования в Горках, 14-15 марта 2019 года / Белорусская государственная сельскохозяйственная академия: под ред. В.И. Желязко. – Горки: РПЦ «Печатник», 2019. – С. 312–316.*
12. Ткаченко Т.М. Розрахунок утриманого поверхневого стоку покрівлю німецького виробника / Т.М. Ткаченко, І.О. Прокопенко // *Екологічна безпека та природокористування. – 2020. – № 3 (35). – С. 44–56.*
13. Lijiao Liu. Impact of green roof plant species on domestic wastewater treatment / Lijiao Liu, Junjun Cao, Mehran Ali, Jiabin Zhang, Zhaolong Wang // *Environmental advances*. – 2021. – Iss. 4. – Article ID: 100059. – <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100059>
14. Procaccini, G. A Green Roof Case Study in the Urban Context of Milan: Integrating the Residential and Cultivation Functions for Sustainable Development / G. Procaccini, C., Monticelli // *Water*. – 2021. – Vol. 13. – Iss. 2. – Article No. 137. – <https://doi.org/10.3390/w13020137>
15. Покрівля без нахилу [Електронний ресурс] / ZinCo. – Режим доступу: <https://zinco.com.ua/uk/systems/extensive/roof-without-slope>. – Дата доступу 17.11.2021
16. Похила зелена покрівля до 35° [Електронний ресурс] / ZinCo. – Режим доступу: <https://zinco.com.ua/uk/systems/inclined-roof/inclined-roof-35>. – Дата доступу 17.11.2021
17. Система управління зливовими водами [Електронний ресурс] / ZinCo. Режим доступу: <https://zinco.com.ua/uk/systems/stormwater-management>. – Дата доступу 17.11.2021
18. Wilo – Использование дождевой воды – справочное пособие. – 04.2016. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://atislav.ru/upload/doc/wilo/Brochure\\_rainwater\\_205x297\\_RU.pdf](https://atislav.ru/upload/doc/wilo/Brochure_rainwater_205x297_RU.pdf). – Дата доступу: 19.09.2021
19. Miller R. "Water use in Syria and Palestine from the Neolithic to the Bronze Age" / R. Miller // *World Archaeology*. 1980. Vol. 11 No. 3. P. 331-341. – Access Mode: <https://www.jstor.org/stable/124254>
20. Ткаченко Т. М. Науково-методологічні основи підвищення рівня екологічної безпеки урбоценозів шляхом створення енергоефективних технологій «зеленого» будівництва : дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01 / Ткаченко Т. М. ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. Київ, 2018. 311 с.

21. Yixin Zhang. Assessment on the Effectiveness of Urban Stormwater Management / Yixin Zhang, Weihao Zhao, Xue Chen, Changhyun Jun, Jianli Hao, Xiaonan Tang, Jun Zhai // Water. 2021. Vol. 13. Iss. 1. Article No. 4. <https://doi.org/10.3390/w13010004>

Стаття надійшла до редакції 17.06.2021 і прийнята до друку після рецензування 22.09.2021

## REFERENCES

1. Ploskyi, V. O., Tkachenko, T. M., Mileikovskiy, V. O., & Dziubenko, V. H. (2016). Modeliuvannya termichnoho oporu travianoho sharu zelenoi pokrivli. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politehnika". Teoriia i praktyka budivnytstva*, 844, 158-163 (in Ukrainian).
2. Pin, A. M. (2018). Adaptatsiia «zelenykh» tekhnologii u kontseptsiiu rozumnoho mista. *Sotsialno-ekonomichni problemy suchasnoho periodu Ukrainy: Zb. nauk. Prats*, 5(133), 76-82 (in Ukrainian). URL: [http://ird.gov.ua/sep/sep20185\(133\)/sep20185\(133\)\\_076\\_PinAM.pdf](http://ird.gov.ua/sep/sep20185(133)/sep20185(133)_076_PinAM.pdf)
3. Gioannini, R., Al-Ajlouni, M., Kile, R., VanLeeuwen, D., & Hilaire, R. St. (2018). Plant Communities Suitable for Green Roofs in Arid Regions. *Sustainability*, 10(6), 1755. doi: <https://doi.org/10.3390/su10061755>
4. Rey, C. V. et al. (2020). Green Roof Design with Engineered Extensive Substrates and Native Species to Evaluate Stormwater Runoff and Plant Establishment in a Neotropical Mountain. *Sustainability*, 12(16), 6534. doi: <https://doi.org/10.3390/su12166534>
5. Zeng, J., Huang, G., Luo, H., Mai, Y., & Wu, H. (2019). First flush of non-point source pollution and hydrological effects of LID in a Guangzhou community. *Scientific Reports*, 9, 13865. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50467-8>
6. Chen, H., Ma, J., Wang, X., Xu, P., Zheng, S., & Zhao, Y. (2018). Effects of Biochar and Sludge on Carbon Storage of Urban Green Roofs. *Forests*, 9(7), 413. doi: <https://doi.org/10.3390/f9070413>
7. Zluwa, I., & Pitha, U. (2021). The Combination of Building Greenery and Photovoltaic Energy Production – A Discussion of Challenges and Opportunities in Design. *Sustainability*, 13(3), 1537. doi: <https://doi.org/10.3390/su13031537>
8. Chen Y. et al. (2020). Numerical Simulation of Local Climate Zone Cooling Achieved through Modification of Trees, Albedo and Green Roofs. A Case Study of Changsha, China. *Sustainability*, 12(7), 2752. doi: <https://doi.org/10.3390/su12072752>
9. Gill, A. S., Purnell, K., Palmer, M. I., Stein, J., & McGuire, K. L. (2020). Microbial Composition and Functional Diversity Differ Across Urban Green Infrastructure Types. *Frontiers in Microbiology*, 11. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00912>
10. Bandehali, B., Miri, T., Onyeaka, H., Kumar, P. (2021). Current State of Indoor Air Phytoremediation Using Potted Plants and Green Walls. *Atmosphere*, 12(4), 473. doi: <https://doi.org/10.3390/atmos12040473>
11. Tkachenko, T., & Listrova, T. (2019). Ispolzovanie zelenykh krovvel v regulirovanii dozhdovykh stokov. Aktualnye nauchno-tekhnicheskie i ekologicheskie problemy melioratsii zemel. (V. Zheliazko, Ed.). In *Mezhdunarodnaya nauchno-praktycheskaya konferentsiya, posviashchennoi 100-letiiu meliorativnogo obrazovaniia v Horkakh* (pp. 312-316). Belorusskaia gosudarstvennaia selskokhoziaistvennaia akademiia. Horky: RPTs «Pechatnyk» (in Russian).
12. Tkachenko, T. M., & Prokopenko, I. O. (2020). Calculation of maintenance of surface drainage roofing of a German manufacturer. *Environmental Safety and Natural Resources*, 35(3), 44-56. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.3.44-56>
13. Liu, L., Cao, J., Ali, M., Zhang, J., & Wang, Z. (2021). Impact of green roof plant species on domestic wastewater treatment. *Environmental advances*, 4, 100059. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100059>

14. Procaccini, G., & Monticelli, C. (2021). A Green Roof Case Study in the Urban Context of Milan: Integrating the Residential and Cultivation Functions for Sustainable Development. *Water*, 13(2), 137. doi: <https://doi.org/10.3390/w13020137>
15. ZinCo (2018). Pokrivlia bez nakhylyu. Retrieved 17.11.2021 from: <https://zinco.com.ua/uk/systems/extensive/roof-without-slope> (In Ukrainian).
16. ZinCo (2018). Pokhylya zelena pokrivlia do 35°. Retrieved 17.11.2021 from: <https://zinco.com.ua/uk/systems/inclined-roof/inclined-roof-35> (in Ukrainian).
17. ZinCo (2018). Systema upravlinnia zlyvovymy vodamy. Retrieved 17.11.2021 from: <https://zinco.com.ua/uk/systems/stormwater-management> (in Ukrainian).
18. Wilo (2016). Ispolzovanie dozhdevoi vody – spravocnoe posobie. Retrieved 19.09.2021 from: [https://atisslab.ru/upload/doc/wilo/Brochure\\_rainwater\\_205x297\\_RU.pdf](https://atisslab.ru/upload/doc/wilo/Brochure_rainwater_205x297_RU.pdf) (in Ukrainian).
19. Miller, R. (1980). Water use in Syria and Palestine from the Neolithic to the Bronze Age. *World Archaeology*, 11(3), 331-341. Retrieved from: <https://www.jstor.org/stable/124254>
20. Tkachenko, T. M. (2018). Naukovo-metodolohichni osnovy pidvyshchennia rinvnia ekolohichnoi bezpeky urbotsenoziv shliakhom stvorennia enerhoefektyvnykh tekhnolohii «zelenoho» budivnytstva. dys. ... d-ra tekhn. Nauk. Kyiv: Kyivskyi natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury (in Ukrainian).
21. Zhang, Y., Zhao, W., Chen X., Jun, C., Hao, J., Tang, X., & Zhai, J. (2021). Assessment on the Effectiveness of Urban Stormwater Management. *Water*, 13(1), 4. doi: <https://doi.org/10.3390/w13010004>

*The article was received 17.06.2021 and was accepted after revision 22.09.2021*

**Глущенко Роман Олександрович**

аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31

ORCID ID: 0000-0003-2863-1480 *e-mail*: [gr2017inc@gmail.com](mailto:gr2017inc@gmail.com)

**Ткаченко Тетяна Миколаївна**

доктор технічних наук, кандидат біологічних наук, професор кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва та архітектури

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31

ORCID ID 0000-0003-2105-5951 *e-mail*: [tkachenkoknuba@gmail.com](mailto:tkachenkoknuba@gmail.com)

**Мілейковський Віктор Олександрович**

доктор технічних наук, доцент Київського національного університету будівництва та архітектури

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31

ORCID ID: 0000-0003-2105-5951 *e-mail*: [v\\_mil@ukr.net](mailto:v_mil@ukr.net)