

УДК 625.731

Каськів В. І.¹, канд. техн. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>**Касай К. І.²**, <https://orcid.org/0000-0003-3292-3339>¹Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна²Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНЮВАННЯ ПРОСОЧУВАННЯ ВОЛОГИ ОПАДІВ У ҐРУНТ УЗБІЧЧЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Анотація

Вступ. У статті досліджується вплив атмосферних опадів на дорожню конструкцію, зокрема на інфільтрацію води у ґрунт узбіччя автомобільних доріг, що є важливим аспектом для забезпечення їхньої довговічності. Забезпечення надійного функціонування дорожньої конструкції стає дедалі важливішим в умовах зростаючих транспортних навантажень і кліматичних змін, що призводять до підвищення кількості опадів. Постійне проникнення вологи в земляне полотно може спричинити руйнування дороги, створюючи ризики для безпечного пересування транспорту та потребу в частому ремонті. Важливим є розроблення та впровадження ефективних методик оцінювання просочування вологи в ґрунт, що дозволить забезпечити довговічність та економічну ефективність експлуатації доріг.

Проблематика. В умовах зміни клімату та збільшення кількості інтенсивних опадів актуальним є питання оцінки їхнього впливу на дорожню конструкцію автомобільної дороги. Накопичення вологи в земляному полотні може призводити до порушення стабільності ґрунтової основи, що знижує несну здатність дорожнього одягу. Дослідження, спрямовані на аналізування інфільтрації опадів та їхнього впливу на дорожні конструкції дозволять впровадити ефективні рішення для підтримування належного експлуатаційного стану доріг.

Мета. Метою даного дослідження є порівняння двох основних методик оцінювання кількості опадів, що проникають у ґрунт узбіччя автомобільних доріг, з урахуванням різних кліматичних і геологічних умов. Дослідження має на меті визначити переваги та обмеження кожної методики для подальшого використання їх у дорожній практиці з метою забезпечення надійності дорожньої конструкції.

Матеріали та методи. У дослідженні використано статистичні методи аналізу даних про опади, отриманих із різних джерел, для обчислення коефіцієнтів кореляції Пірсона. Це дозволило оцінити взаємозв'язок між даними про кількість опадів і їхній вплив на ґрунт узбіччя. Крім того, у роботі було застосовано порівняння двох методик: методики регулювання водно-теплогового режиму дорожніх конструкцій, що враховує сезонні кліматичні зміни, та методики застосування геосинтетичних матеріалів для контролю інфільтрації води.

Результати. Аналіз метеорологічних даних показав високий ступінь кореляції, що свідчить про узгодженість різних джерел інформації та їхню придатність для використання в наукових розрахунках. Методика регулювання водно-теплогового режиму враховує природні та сезонні чинники, які впливають на процес інфільтрації вологи, але вона є складною у застосуванні через необхідність великої кількості вхідних даних і використання підбору значень для отримання точних результатів. Методика, що передбачає використання геосинтетичних матеріалів, виявилася ефективнішою в умовах підвищеної вологості та на ділянках з ускладненою геологічною ситуацією, оскільки вона дозволяє краще контролювати надходження води в узбіччя за допомогою сучасних технічних рішень, проте у ній не враховано вид ґрунту.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що обидві розглянуті методики можуть бути ефективно застосовані для оцінки інфільтрації атмосферних опадів у ґрунт узбіччя автомобільних доріг залежно від конкретних умов проєкту. Методика регулювання водно-теплогового

режиму більш доцільна для застосування у проєктах, де необхідно враховувати сезонні зміни клімату та природні процеси. Натомість методика використання геосинтетичних матеріалів є ефективнішою на ділянках з високим рівнем вологості та складними геологічними умовами. Результати дослідження сприятимуть покращенню проєктних рішень щодо експлуатації доріг в умовах змін клімату та підвищення стійкості дорожніх конструкцій до впливу опадів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на удосконалення існуючих методик і розроблення нових підходів, які дозволять підвищити надійність дорожньої конструкції.

Ключові слова: автомобільна дорога, вологість, ґрунт, дощ, земляне полотно, опади, узбіччя.

Вступ

Пріоритетною задачею дорожнього господарства України залишається подальший розвиток мережі автомобільних доріг, з одночасним забезпеченням нормативного рівня якісного стану існуючих шляхів сполучення. У сучасних умовах відновлення та розширення дорожньої інфраструктури є важливим елементом економічної стабілізації та розвитку країни. Ефективність функціонування дорожнього господарства, у цілому, значним чином залежить від темпів і обсягів розбудови нових доріг, а також від якості підтримування існуючої мережі на належному експлуатаційному рівні.

Сучасна транспортна інфраструктура, включаючи автомобільні дороги, як складні інженерні споруди, потребує надійних рішень щодо забезпечення їхньої довговічності та стійкості в умовах зростаючих транспортних навантажень і мінливого клімату.

Як і будь-яка інженерна споруда, автомобільна дорога складається з двох основних елементів: фундаменту, що включає ґрунтову основу — земляне полотно та конструктивної частини — дорожнього одягу. Від якості кожного із цих елементів залежить її надійна робота. При цьому, надійна робота автомобільної дороги є не тільки питанням транспортної логістики, але й важливою передумовою для економічного зростання та розвитку соціальної сфери країни. У сучасних умовах автомобільні дороги стають ключовими артеріями, що з'єднують регіони, забезпечують постачання товарами і послугами та слугують важливим елементом національної безпеки. Тому питання їхнього розвитку, ремонту і належного експлуатаційного утримування має першочергове значення для сталого розвитку держави.

Основна частина

У [1] були розглянуті питання щодо вибору тривалості та інтенсивності опадів під час розрахунку інфільтрації вологи в ґрунт земляного полотна. Окрім цих параметрів є необхідність вибору достовірних даних щодо кількості опадів, які потрібно використовувати у розрахунках, а також теоретичних підходів і розрахункових формул, зокрема для визначення кількості інфільтрації вологи опадів в узбіччя земляного полотна автомобільних доріг, як однієї із величин, які впливають на міцнісні характеристики ґрунту земляного полотна.

Розглянемо місячні суми опадів, отримані з різних довідників та метеорологічних джерел. Основною метою є визначення ступеня взаємозв'язку між цими рядами даних за допомогою обчислення коефіцієнтів кореляції. Порівняння даних з різних джерел дозволяє оцінити їхню надійність та узгодженість, а також виявити можливі відмінності, що можуть бути обумовлені методами збору інформації чи географічними особливостями регіонів спостереження. Визначення кореляційних залежностей між рядами сум опадів вважаємо допоможе обрати джерело даних для подальших наукових досліджень, зокрема для розрахунку кількості опадів, яка просочується в узбіччя автомобільної дороги.

До розрахунків були прийняті три ряди даних сум опадів за теплі періоди року (з квітня по жовтень) для Київської області за даними багаторічних спостережень, отриманих за період з 1891 року до 1980 року [2], даними нормативного документа [3] і даними Українського гідрометеорологічного інституту (УкрГМІ) (період спостереження 1991-1921 роки).

Позначимо дані сум опадів із [2] як X_1 , мм: 34, 56, 74, 82, 69, 49, 39.

Позначимо дані сум опадів із [3] як X_2 , мм: 48, 56, 76, 77, 68, 55, 42.

Позначимо дані сум опадів УкрГМІ як X_3 , мм: 39, 64, 71, 73, 55, 53, 42.

Були розраховані коефіцієнти кореляції Пірсона для кожної пари рядів.

Розрахунки виконували за таким алгоритмом:

1. Обчислюють середні значення величин із кожного ряду, X_{cp} .

2. Визначають коваріацію для кожної із пар рядів. Наприклад, для пар значень X_1 і X_2 коваріацію розраховують за формулою:

$$Cov(X_1, X_2) = \frac{\sum (X_{1i} - X_{1cp})(X_{2i} - X_{2cp})}{n}, \quad (1)$$

де n — кількість значень у ряді.

3. Розраховують стандартне відхилення для кожного ряду за формулою:

$$\sigma_{Xk} = \sqrt{\frac{\sum (X_{ki} - X_{kcp})^2}{n}}, \quad (2)$$

k — номер ряду.

4. Знаходять коефіцієнт кореляції для кожної із пар рядів. Для пар значень X_1 і X_2 коефіцієнт кореляції розраховують за формулою:

$$r_{X_1, X_2} = \frac{Cov(X_1, X_2)}{\sigma_{X_1} \sigma_{X_2}}. \quad (3)$$

Результати розрахунку наведені у **табл. 1**.

Таблиця 1

Результати розрахунку кореляції рядів даних сум опадів

Пара рядів	Середнє X_1	Середнє X_2	Середнє X_3	Коваріація	Стандартне відхилення X_1	Стандартне відхилення X_2	Стандартне відхилення X_3	Коефіцієнт кореляції	Висновки
$X_1 - X_2$	57,57	60,29	—	205,12	16,79	12,63	—	0,97	Сильна позитивна кореляція
$X_1 - X_3$	57,57	—	56,71	189,16	16,79	—	12,36	0,91	Сильна позитивна кореляція
$X_2 - X_3$	—	60,29	56,71	136,94	—	12,63	12,36	0,88	Сильна позитивна кореляція

Аналіз результатів **табл. 1** показує, що коефіцієнт кореляції між рядами X_1 і X_2 становить $r = 0,97$, що свідчить про дуже сильну позитивну кореляцію. Це означає, що значення рядів мають подібну тенденцію в часі. Ця тенденція прослідковується і для інших пар рядів X_1 і X_3 ($r = 0,91$), X_2 і X_3 ($r = 0,88$), хоча для цих рядів сум опадів кореляція трохи слабша, ніж у попередньому випадку. Загалом, усі три ряди демонструють високий ступінь взаємозв'язку, що дозволяє припустити, що дані з різних джерел добре узгоджуються між собою. Це може свідчити про стабільність погодних умов у досліджуваних періодах, а також підтверджує надійність отриманих кліматичних даних для подальших досліджень і для розрахунків можна використовувати дані із зазначених трьох джерел. На думку авторів, як би це не парадоксально звучало, джерело [2] на теперішній час містить найбільший спектр даних про кліматичні характеристики України і, як показують розрахунки, дані із [2] є репрезентативними і у сучасних умовах зміни клімату країни.

Окрім репрезентативних даних про опади і їхню кількість для розрахунків, зокрема визначення кількості опадів, що просочилися в ґрунт узбіччя земляного полотна автомобільних доріг, потрібен також точний математичний апарат. На теперішній час в дорожній галузі існує декілька підходів до вирішення цього питання вони висвітлені у наукових працях [4 – 17] і технічних документах [18 – 23].

Розглянемо два із них, які описані у [18] і [19].

Методика [18] зосереджена на розрахунку надходження вологи в основу земляного полотна автомобільних доріг, що включає визначення обсягів атмосферних опадів, які можуть проникнути в ґрунт. Основна увага приділяється сезонним змінам вологості, включаючи осіннє накопичення вологи, зимове морозне здимання та весняне відтавання. Цей підхід враховує вплив поверхневих і ґрунтових вод на загальну кількість вологи, що просочується в земляне полотно. Якщо виокремити тільки питання інфільтрації атмосферних опадів у ґрунт узбіччя автомобільної дороги, то [18] враховує змочування поверхні, інтенсивність стоку та проникнення води в ґрунт. Важливим є використання коефіцієнтів, що залежать від типу покриття та узбіччя, а також проникності ґрунту.

Рекомендації [19] спрямовані на регулювання водно-теплогового режиму шляхом використання геосинтетичних матеріалів. Основна увага приділяється відведенню надлишкової вологи з основи дорожнього одягу та регулюванню інфільтрації через використання дренажних та фільтруючих систем. [19] орієнтовані на розрахунок величини опадів, що просочуються в узбіччя, з урахуванням стоку з проїзної частини. Методика базується на визначенні шару стоку з поверхні дороги та узбіччя, враховуючи час водовіддачі і коефіцієнти змочування.

Згідно з [18] для визначення середньозважених значень величини надходження інфільтраційної вологи в основу проїзної частини використовують наступний алгоритм розрахунків.

Визначають можливу сумарну тривалість опадів 5 % забезпеченості за статистичними метеорологічними даними за всі $N_{\text{років}}$, що прийняті до розрахунку.

Кількість дощів 5 % забезпеченості:

$$m = \frac{m_{\text{ср}}}{T_{\text{д(ср)}}} \cdot T_{\text{д}}, \quad (4)$$

де $m_{\text{ср}}$ — середня кількість дощів за $N_{\text{років}}$ років;
 $T_{\text{д(ср)}}$ — середня сумарна тривалість опадів, хв;
 $T_{\text{д, хв.}}$ — можлива сумарна тривалість опадів 5 % забезпеченості.

Величину дефіциту вологості повітря визначають за середньорічними даними не менше ніж 5-ти річного періоду і до розрахунку приймають величину 5 % забезпеченості (d , мбар).

Визначають середню інтенсивність дощу (мм/хв) за формулою:

$$i_{\text{д}} = \frac{H_{\text{д(ср)}}}{T_{\text{д(ср)}}}, \quad (5)$$

де $H_{\text{д(ср)}}$ — середньомісячна кількість опадів, мм.

Величину змочування поверхні покриття, (мм) визначають за формулою:

$$H_{\text{зм(п)}} = a_{\text{зм}} \cdot m \cdot \sqrt[3]{d \times \frac{T' - T_{\text{д}}}{m}}, \quad (6)$$

$$H_{\text{зм(п)}} \leq \max H_{\text{зм(п)}} = \max h_{\text{зм}} \cdot m,$$

де T' — тривалість розрахункового періоду, хв;
 $a_{\text{зм}}, \max h_{\text{зм}}$ — показники змочування поверхні проїзної частини і узбіч, мм (табл. 6.1 [18]).

За $H_{\text{зм(п)}} \geq i_{\text{д}} \cdot T_{\text{д}}$ всі опади ідуть на змочування, проникнення відсутнє. За $H_{\text{зм(п)}} < i_{\text{д}} \cdot T_{\text{д}}$ відбувається проникнення опадів у покриття.

Середня тривалість проникання вологи в покриття за один дощ, хв:

$$t_{\text{вп(п)}} = \frac{i_{\text{д}} \cdot T_{\text{д}} - H_{\text{зм(п)}}}{i_{\text{д}} \cdot m}. \quad (7)$$

Кількість води, що проникає в покрив, мм:

$$H_{\text{вп(п)}} = 0,013 \cdot m \cdot \ln(1 + a_0 \cdot i_d) \cdot 10^{0,4 \ln t_{\text{вп(п)}}}, \quad (8)$$

де a_0 — параметр, що становить 120 для літнього, 100 — для весняного і 80 — осіннього періодів.
Інтенсивність стоку з покриву, (мм/хв) визначають за формулою:

$$i_{\text{ст(п)}} = i_d - \frac{H_{\text{вп(п)}}}{m \cdot t_{\text{вп(п)}}}. \quad (9)$$

Інтенсивність надходження води на узбіччя з урахуванням стоку з проїзної частини, мм/хв:

$$i_{\text{пв}} = i_d + i_{\text{ст(п)}} \cdot \frac{a}{l}, \quad (10)$$

де a — ширина односкатної або половини двоскатної проїзної частини у бік нахилу, м;
 l — довжина узбіччя в бік нахилу, м.
Величина змочування поверхні узбіч, мм:

$$H_{\text{зм}} = a_{\text{зм}} \cdot m \cdot \sqrt[3]{d \cdot \frac{T' - T_d}{m}}, \quad (11)$$

$$H_{\text{зм}} \leq \max H_{\text{зм}} = \max h_{\text{зм}} \cdot m,$$

де $a_{\text{зм}}, \max h_{\text{зм}}$ — показники змочування поверхні проїзної частини і узбіч, мм (табл. 6.1 [18]).
За $H_{\text{зм}} \geq i_{\text{пв}} \cdot T_d$ вся вода, яка потрапляє на узбіччя, іде на змочування, проникнення відсутнє. За $H_{\text{зм}} < i_{\text{пв}} \cdot T_d$ відбувається проникнення води у ґрунтові узбіччя.

Коефіцієнт проникнення в ґрунт земляного полотна:

$$C = 6000 \cdot \frac{\sqrt[3]{K}}{W_T^2} \left(1 - \sqrt{\frac{W_{\text{опт}}}{W_{\text{вп}}}} \right) + 30 \cdot K, \quad (12)$$

де K — коефіцієнт фільтрації ґрунту;
 W_T — вологість на межі текучості ґрунту, %;
 $W_{\text{опт}}$ — оптимальна вологість ґрунту, %;
 $W_{\text{вп}}$ — повна вологоємність ґрунту, %.
Повну вологоємність ґрунту (%) розраховують за формулою:

$$W_{\text{вп}} = \frac{n \cdot \rho_v}{\rho_s} \cdot 100, \quad (13)$$

де n — пористість ґрунту;
 ρ_v — щільність води, г/см³;
 ρ_s — щільність твердих часток ґрунту, г/см³.

Величини $K, W_T, W_{\text{опт}}, \rho_s$ визначають експериментально, керуючись положеннями ДСТУ Б В.2.1-12 [24], ДСТУ Б В.2.1-17 [25], ДСТУ Б В.2.1-23 [26].

Визначення інтенсивності проникнення води в узбіччя (мм/хв) виконують за такими формулами:

$$(i_{\text{пв}} \leq 0,02 \cdot C), \quad i_{\text{вп}} = i_{\text{пв}}, \quad (14)$$

$$(i_{\text{пв}} > 0,02 \cdot C), \quad i_{\text{вп}} = C \cdot \left(0,02 + 10^{0,02 + 0,68 \cdot \lg \frac{i_{\text{пв}} - i_{\text{вп}}}{\varphi(l)}} \right),$$

де $\varphi(l)$ — функція похилу поверхні (табл. 6.2 [18]).

$$i_{\text{ст}} = i_{\text{пв}} - i_{\text{вп}}. \quad (15)$$

Інтенсивність проникнення визначають методом підбору.

Кількість води, що просочується в узбіччя, мм:

$$H_{\text{вп}(y)} = A_{\text{укр}} \cdot i_{\text{вп}} \cdot \left[T_{\text{д}} - \left(\frac{H_{\text{зм}(п)}}{i_{\text{д}}} - \frac{H_{\text{зм}} - H_{\text{зм}(п)}}{i_{\text{пв}}} \right) \right], \quad (16)$$

де $A_{\text{укр}}$ — коефіцієнт, який враховує тип укріплення узбіч (табл. 6.3 [18]).
Згідно з [19] величина опадів, що просочились в узбіччя:

$$I_{\text{уз}} = S + h_{\text{пч}} - h_{\text{уз}}, \quad (17)$$

де $h_{\text{пч}}$ — шар стоку з проїзної частини, мм;
 $h_{\text{уз}}$ — шар стоку з узбіч, мм.
Шар стоку з проїзної частини:

$$h_{\text{пч}} = i_{\text{д}} (1 - a_{\text{зм}}) t_{\text{в}}, \quad (18)$$

де $i_{\text{д}}$ — інтенсивність дощу, мм/хв;
 $a_{\text{зм}}$ — коефіцієнт змочування, залежить від покриття проїзної частини або узбіччя: для асфальтобетонного покриття — 0,01; цементобетонного — 0,02; ґрунт — 0,04; трав'яний покриття середньої густини — 0,10; густий трав'яний покриття — 0,15;
 $t_{\text{в}}$ — час стоку (водовіддачі), хв.
Час стоку (водовіддачі):

$$t_{\text{в}} = t_{\text{д}} - t_{\text{с}}, \quad (19)$$

де $t_{\text{д}}$ — тривалість дощу, хв;
 $t_{\text{с}}$ — час, необхідний для встановлення повного стоку, хв.
Час, необхідний для встановлення повного стоку:

$$t_{\text{с}} = \frac{18,6 b_{\text{с}}^{0,4}}{[f(I)]^{0,4} m_{\text{с}}^{0,4}}, \quad (20)$$

де $b_{\text{с}}$ — середня довжина стоку (ширина узбіччя), м;
 $f(I)$ — функція похилу склону (проїзної частини, узбіччя, укосу) (табл. А.3 [19]);
 $m_{\text{с}}$ — коефіцієнт, що враховує шорсткість поверхні (табл. А.4 [19]).
Шар стоку з узбіч:

$$h_{\text{уз}} = q_{\text{уз}} t_{\text{д}} / (10^{-3} F), \quad (21)$$

де $q_{\text{уз}}$ — витрата стоку з узбіч, мм/хв;
 F — площа стоку, ширину при визначенні площі приймаємо 1 м².

Розрахунки виконані за двома методиками для вихідних даних: категорія автомобільної дороги — II; матеріал дорожнього покриття — асфальтобетон; узбіччя не укріплене, трав'яний покриття; площа розрахунку — 3,75 м²; ґрунт супісок — вологість на межі текучості 27 %, оптимальна вологість 20 %, пористість 40 %, щільність часток ґрунту 1,27 г/см³, коефіцієнт фільтрації 1,25 м/добу; опади — кількість дощів 1, тривалість 30 хв, інтенсивність 1,26 мм/хв. Інші показники вихідних даних отримували як похідні величини від наведених. Наприклад, похил проїзної частини і узбіччя залежать від категорії дороги, а кількість опадів від їхньої тривалості й інтенсивності тощо.

Результати розрахунків показали, що за методикою [18] не можливо розрахувати кількість води, що просочується в узбіччя, оскільки у формулі (14) для визначення інтенсивності проникнення води в узбіччя розрахунки потрібно виконувати методом підбору, для наданих вихідних даних виникає помилка через те, що вираз всередині логарифма став від'ємним.

Висновки

Виконані розрахунки і їхній аналіз дозволяють сформулювати наступні твердження:

1. Проведені кореляційні розрахунки показали, що ряди даних про суми опадів з різних джерел мають високий ступінь взаємозв'язку. Коефіцієнти кореляції між рядами даних X_1 і X_2 (0,97),

X_1 і X_3 (0,91), а також X_2 і X_3 (0,88) свідчать про узгодженість даних і можливість їхнього використання для розрахунків, зокрема інфільтрації опадів у ґрунт узбіччя автомобільних доріг. Ці результати підтверджують надійність вибраних даних і дозволяють вважати їх достатньо репрезентативними для подальших досліджень.

2. Порівняння двох методик визначення кількості опадів, що просочилися в ґрунт, виявило їхні ключові переваги та обмеження. Методика, яка викладена у [18] більш детально враховує сезонні зміни та природні процеси, що впливають на інфільтрацію вологи, але залежить від великої кількості параметрів та коефіцієнтів, вимагає точних даних, які можуть бути складними для отримання в польових умовах і обмежена для невеликої кількості дощів. У методиці, яка викладена у [19], зроблено акцент на технічних рішеннях, таких як використання геосинтетичних матеріалів, що дозволяє ефективно контролювати інфільтрацію води, однак вона менш орієнтована на аналіз природних чинників і у ній не враховано вид ґрунту.

3. Результати дослідження показали, що обидві методики можуть бути використані для оцінки інфільтрації опадів у ґрунт залежно від умов проєкту та доступних ресурсів. [18] підходить для проєктів, де необхідно врахувати сезонні кліматичні зміни і природні процеси. [19] є ефективною на ділянках з підвищеним рівнем вологості та складними геологічними умовами, де необхідно застосовувати сучасні технічні рішення для регулювання водно-теплогового режиму.

У подальших дослідженнях планується врахувати переваги і недоліки обох підходів з метою удосконалення розрахунку інфільтрації опадів у ґрунт земляного полотна автомобільних доріг.

Список літератури

1. Петрович В. В., Касай К. І. Дослідження характеристик опадів для розрахунків поверхневого водовідведення й інфільтрації вологи в ґрунт земляного полотна автомобільних доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2024. Вип. 119. Ч. 2. С. 137–146.
2. Науково-прикладний довідник з клімату СРСР. Серія 3. Багаторічні дані. Частина 1-6. Випуск 10. Українська РСР. Книга 1. Гідрометіоіздат, 1990. 605 с.
3. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія. Київ, 2011. 127 с. (Інформація та документація).
4. Сіденко В. М. Розрахунок і регулювання водно-теплогового режиму дорожніх одягів і земляного полотна. Автотрансиздат, 1962. 116 с.
5. Пузаков М. А., Золотарь І. А., Сіденко В. М., Тулаєв А. Я. Водно-тепловий режим земляного полотна і дорожніх одягів. Транспорт, 1971. 414 с.
6. Сіденко В. М. Автомобільні дороги. Удосконалення методів проєктування і будівництва. Будівельник, 1973. 279 с.
7. Савенко В. Я., Каськів В. І. Вплив опадів на розподіл вологості ґрунтів верхньої частини земляного полотна. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1997. Вип. 54. С. 6–11.
8. Каськів В. І. Удосконалення показників робочої зони високих насипів з врахуванням інфільтрації атмосферних опадів : дис... канд. техн. наук : 05.22.11. К., 1998. 286 с.
9. Савенко В. Я., Славінська О. С., Стюжка В. В. Індивідуальний підхід при проєктуванні дренажів мілкового залягання з урахуванням кліматичних особливостей регіону. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2011. Вип. 80. С. 3–15.
10. Стюжка В. В. Удосконалення методу розрахунку дренажних систем мілкового закладення : дис... канд. техн. наук : 05.22.11. К., 2015. 219 с.
11. Бубела А. В. Дослідження закономірностей зволоження дорожньої конструкції та методи його регулювання. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2019. Вип. 105. С. 44–48. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/105/44.pdf.
12. Savenko V., Kvatadze A., Davydenko O., Stozhka V., Ianchuk L. Forecasting of the moisture mode of the drainage layer of a road structure under the action of a load. *Eastern-European. Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4, No. 7 (106). P. 62–75. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209421>.
13. Бубела А. В. Методологія проєктування поперечних дренажів мілкового закладення з оцінкою якісного стану автомобільної дороги: дис... д-ра. техн. наук : 05.22.11. К., 2021. 427 с.

14. Рувинський В. І. Оптимальні конструкції земляного полотна на основі регулювання водно-теплового режиму. Транспорт, 1982. 166 с.
15. Каськів В. І., Гавришук В. В. Обґрунтування доцільності проєктування систем поверхневого водовідведення, як складової комплексу очисних споруд на автомобільних дорогах. *Дороги і мости*. 2020. Вип. 21. С. 95–109. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.095>.
16. Kaskiv V., Havryshchuk V. Mathematical model for the duration of runoff formation determined from the road surface. *Heliyon*. Volume 6, Issue 12, E05687, December 01, 2020 URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05687>.
17. Солодкий С. Й., Каськів В. І., Гавришук В. В. Поверхнева концентрація стоку та розрахунковий похил автомобільних доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2019. Вип. 106. С. 46–53.
18. МР В.2.3-02070915-849:2014 Методичні рекомендації щодо регулювання водно-теплового режиму у межах робочого шару земляного полотна автомобільних доріг. 2014. 61 с. (Інформація та документація).
19. Р В.2.3-218-02070915-755:2009 Рекомендації із застосування геосинтетичних матеріалів при регулюванні водно-теплового режиму дорожньої конструкції. 2009. 13 с. (Інформація та документація).
20. Посібник до ДСТУ 9057:2020 настанова з проєктування та влаштування споруд поверхневого водовідведення на автомобільних дорогах загального користування. К., 2020. 121 с. (Інформація та документація).
21. М 218-02070915-684:2011 Методика визначення пропускної здатності дренажної конструкції мілкового залягання з урахуванням річного циклу роботи. 2011. 26 с. (Інформація та документація).
22. МР В.2.3-37641918-933:2023 Методичні рекомендації з проєктування дорожніх конструкцій з поперечними трубчастими дренажами мілкового закладання на основі дослідження напружено-деформованого стану. 2023. 31 с. (Інформація та документація).
23. Посібник з проєктування методів регулювання водно-теплового режиму верхньої частини земляного полотна (до СНиП 2.05.02-85). 1989. 97 с. (Інформація та документація).
24. ДСТУ Б В.2.1-12:2009 Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Метод лабораторного визначення максимальної щільності. 2010. 18 с. (Інформація та документація).
25. ДСТУ Б В.2.1-17:2009 Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей. 2010. 33 с. (Інформація та документація).
26. ДСТУ Б В.2.1-23:2009 Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення коефіцієнта фільтрації. 2010. 19 с. (Інформація та документація).

References

1. Petrovych V. V., Kasai K. I. Doslidzhennia kharakterystyk opadiv dlia rozrakhunkiv poverkhnevoho vodovidvedennia y infiltratsii volohy v grunt zemlianooho polotna avtomobilnykh dorih. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo* (Research of precipitation characteristics for calculations of surface water drainage and moisture infiltration into the soil of road surface). 2024. Vyp. 119. Ch.2. P. 137–146 [in Ukrainian].
2. Naukovo-prikladnyi dovidnyk z klimatu SRSR. Serii 3. Bahatorichni dani. Chastyny 1-6. Vypusk 10 (Scientific and applied handbook on the climate of the USSR. Series 3. Long-term data). Ukrainska RSR. Knyha 1. Hidrometyoizdat, 1990. 605 p. [in Ukrainian].
3. DSTU-N B V.1.1-27:2010 Budivelnia klimatolohiia (Building climatology). Minrehionbud Ukrainy, 2011. 127 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia). [in Ukrainian].
4. Sidenko V. M. Rozrakhunok i rehulivannia vodno-teplovoho rezhymu dorozhnikh odiahiv i zemlianooho polotna (Calculation and regulation of the water-thermal regime of road surfaces and ground surface). *Avtotransizdat*, 1962. 116 p. [in Ukrainian].

5. Puzakov M. A., Zolotar I. A., Sidenko V. M., Tulaiev A. Ia. Vodno-teplovyyi rezhym zemlianooho polotna i dorozhnikh odiahiv (Water-heat mode of the ground surface and road clothing). Transport, 1971. 414 p. [in Ukrainian].
6. Sidenko V. M. Avtomobilni dorohy. Udoskonalennia metodiv proektuvannia i budivnytstva (Automobile roads. Improvement of design and construction methods). Budivelnyk, 1973. 279 p. [in Ukrainian].
7. Savenko V. Ia., Kaskiv V. I. Vplyv opadiv na rozpodil volohosti hruntiv verkhnoi chastyny zemlianooho polotna. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo* (The influence of precipitation on the distribution of soil moisture in the upper part of the subsoil). 1997. Vyp. 54. P. 6–11 [in Ukrainian].
8. Kaskiv V. I. Udoskonalennia pokaznykiv robochoi zony vysokokh nasypiv z vrakhuvanniam infiltratsii atmosferykh opadiv (Improvement of indicators of the working zone of high embankments, taking into account the infiltration of atmospheric precipitation) : dys... kand. tekhn. nauk : 05.22.11. K., 1998. 286 p. [in Ukrainian].
9. Savenko V. Ia., Slavinska O. S., Stozhka V. V. Indyvidualnyi pidkhid pry proektuvanni drenazhiv milkoho zaliahannia z urakhuvanniam klimatychnykh osoblyvostei rehionu (An individual approach to the design of shallow drainages taking into account the climatic features of the region). *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*. 2011. Vyp. 80. P. 3–15 [in Ukrainian].
10. Stozhka V. V. Udoskonalennia metodu rozrakhunku drenazhnykh system milkoho zakladennia (Improvement of the calculation method of drainage systems of shallow laying) : dys... kand. tekhn. nauk : 05.22.11. K., 2015. 219 p. [in Ukrainian].
11. Bubela A. V. Doslidzhennia zakonamirnostei zvolozhennia dorozhnoi konstruktsii ta metody yoho rehuliuвання. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo* (Study of patterns of moistening of the road structure and methods of its regulation). 2019. Issue 105. P. 44–48. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/105/44.pdf [in Ukrainian].
12. Savenko V., Kvatadze A., Davydenko O., Stozhka V., Ianchuk L. Forecasting of the moisture mode of the drainage layer of a road structure under the action of a load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4, No. 7 (106). P. 62–75. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209421> [in Ukrainian].
13. Bubela A. V. Metodolohiia proektuvannia poperechnykh drenazhiv milkoho zakladannia z otsinkoiu yakisnoho stanu avtomobilnoi dorohy (Methodology for the design of transverse drains of shallow laying with an assessment of the quality condition of the road): dys... d-ra. tekhn. nauk : 05.22.11. K., 2021. 427 p. [in Ukrainian].
14. Ruvynskyi V. I. Optymalni konstruktsii zemlianooho polotna na osnovi rehuliuвання vodno-teplovoho rezhymu (Optimal constructions of the ground surface based on the regulation of the water-heat regime). Transport, 1982. 166 p. [in Ukrainian].
15. Kaskiv V. I., Havryshchuk V. V. Obgruntuvannia dotsilnosti proiektuvannia system poverkhnevoho vodovidvedennia, yak skladovoi kompleksu ochysnykh sporud na avtomobilnykh dorohakh (Justification of the expediency of designing surface drainage systems as a component of the complex of treatment facilities on highways). *Dorohy i mosty*. 2020. Issue 21. P. 95–109. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.095> [in Ukrainian].
16. Kaskiv V., Havryshchuk V. Mathematical model for the duration of runoff formation determined from the road surface. *Heliyon*. Volume 6, Issue 12, E05687, December 01, 2020 URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05687> [in English].
17. Solodkyi S. I., Kaskiv V. I., Havryshchuk V. V. Poverkhneva kontsentratsiia stoku ta rozrakhunkovyi pokhyl avtomobilnykh doroh (Surface concentration of runoff and calculated slope of highways.). *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*. 2019. Issue 106. P. 46–53 [in Ukrainian].
18. MR V 2.3-02070915-849:2014 Metodychni rekomendatsii shchodo rehuliuвання vodno-teplovoho rezhymu u mezhakh robochoho sharu zemlianooho polotna avtomobilnykh doroh (Methodological recommendations for regulating the water-heat regime within the working layer of the road surface). 2014. 61 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

19. R V.2.3-218-02070915-755:2009 Rekomendatsii iz zastosuvannia heosyntetychnykh materialiv pry rehuliuванні vodno-teplovoho rezhymu dorozhnoi konstruktzii (Recommendations for the use of geosynthetic materials in regulating the water-thermal regime of the road structure). 2009. 13 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
20. Posibnyk do DSTU 9057:2020 nastanova z proiektuvannia ta vlashtuvannia sporud poverkhnevoho vodovidvedennia na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia (guidelines for the design and installation of surface water drainage facilities on public highways). K., 2020. 121 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
21. M 218-02070915-684:2011 Metodyka vyznachennia propusknoi zdatnosti drenaznoi konstruktzii milkoho zaliahannia z urakhuvanniam richnoho tsykladu roboty (Methodology for determining the throughput capacity of a shallow drainage structure taking into account the annual work cycle). 2011. 26 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
22. MR V.2.3-37641918-933:2023 Metodichni rekomendatsii z proiektuvannia dorozhnikh konstruktzii z poperechnymy trubchastymy drenazhamy milkoho zakladannia na osnovi doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu (Methodical recommendations for the design of road structures with transverse tubular drains of shallow laying based on the study of the stress-strain state). 2023. 31 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
23. Posibnyk z proektuvannia metodiv rehuliuвання vodno-teplovoho rezhymu verkhnoi chastyny zemlianoho polotna (Guide to the design of methods of regulating the water-thermal regime of the upper part of the earth bed) (do SNyP 2.05.02-85). 1989. 97 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
24. DSTU B V.2.1-12:2009 Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Metod laboratornoho vyznachennia maksimalnoi shchilnosti (Foundations and foundations of buildings and structures. Soils. Method of laboratory determination of maximum density). 2010. 18 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
25. DSTU B V.2.1-17:2009 Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Metody laboratornoho vyznachennia fizychnykh vlastyvostei (Foundations and foundations of buildings and structures. Soils. Method of laboratory determination of maximum density). 2010. 33 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
26. DSTU B V.2.1-23:2009 Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Metody laboratornoho vyznachennia koefitsienta filtratsii (Foundations and foundations of buildings and structures. Soils. Methods of laboratory determination of the filtration coefficient). 2010. 19 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

Volodymyr Kaskiv¹, *Ph.D., Associate Prof.*, <https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>
Kostiantyn Kasai², <https://orcid.org/0000-0003-3292-3339>

¹State Enterprise “National Institute for Development Infrastructure” (SE “NIDI”), Kyiv, Ukraine

²National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF APPROACHES TO ASSESSING RAINWATER INFILTRATION INTO ROADSIDE SOILS

Abstract

Introduction. The article investigates the impact of atmospheric precipitation on road structures, specifically focusing on water infiltration into the roadside soil along highways, which is a critical aspect of road infrastructure maintenance. Ensuring the reliable operation of the roadway is becoming increasingly important due to rising traffic loads and climate changes that result in increased precipitation. Continuous moisture penetration into the road embankment can lead to road degradation, creating risks for safe traffic movement and necessitating frequent repairs. It is essential to develop and implement effective methods for assessing moisture infiltration into the soil, which will help ensure the longevity and cost-efficiency of road operation.

Problem Statement. With climate change and increasing intensity of precipitation, the issue of assessing its impact on road structures becomes more relevant. Moisture accumulation in the road embankment can disrupt the stability of the soil foundation, reducing the load-bearing capacity of the road surface. Research aimed at analyzing rainfall infiltration and its effect on road structures will allow the implementation of effective solutions to maintain the operational condition of roads.

Objective. The objective of this study is to compare two main methods for assessing the amount of precipitation infiltrating the roadside soil along highways, taking into account different climatic and geological conditions. The research aims to identify the advantages and limitations of each method for further application in road engineering practice to ensure the reliability of road infrastructure.

Materials and Methods. The study utilized statistical methods to analyze precipitation data from various sources, calculating Pearson correlation coefficients. This allowed an assessment of the relationship between precipitation data and its impact on roadside soil. Additionally, the study compared two methodologies: the method of regulating the hydrothermal regime of road structures, which accounts for seasonal climatic changes, and the method of using geosynthetic materials to control water infiltration.

Results. Data analysis showed that all three sets of meteorological data have a high degree of correlation, indicating consistency across different sources and their suitability for scientific calculations. The comparison of methods revealed that the method of regulating the hydrothermal regime takes into account natural and seasonal factors affecting the moisture infiltration process, but its application is complex due to the large amount of input data required and the need for parameter adjustments to achieve accurate results. The method involving the use of geosynthetic materials proved to be more effective in conditions of increased moisture and in areas with complicated geological conditions, as it allows for better control of water ingress into the roadside using modern technical solutions.

Conclusions. The study concluded that both methods can be effectively applied to assess precipitation infiltration into roadside soil depending on the specific project conditions. The method of regulating the hydrothermal regime is more suitable for projects where seasonal climate changes and natural processes need to be considered. On the other hand, the geosynthetic materials method is more effective in areas with high moisture levels and complex geological conditions. The research results will contribute to improving design solutions for road operation in the context of climate change and enhancing the resilience of road structures to the effects of precipitation. Further research should focus on improving existing methodologies and developing new approaches to increase the reliability of road structures.

Keywords: highway, moisture, soil, rain, embankment, precipitation, roadside.