https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.138

УДК 625.7/.8

Бондаренко Л. П., *канд. техн. наук, доц., http://orcid.org/0000-0002-8239-065X*
Кватадзе Є. І., *аспірантка, https://orcid.org/0000-0003-2798-8955*

Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВОЛОГОПРОВІДНОСТІ ҐРУНТІВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Анотація

Вступ. Всі періоди зволоження дорожньої конструкції складають єдиний закономірний цикл руху вологи в ній внаслідок впливу природних факторів. Для остаточного вибору конструкції земляного полотна та дорожнього одягу слід встановити значення щільності, вологості та морозного здимання ґрунтів у річному циклі. Для прогнозу цих величин необхідно визначити кількість надходження вологи в ґрунт від атмосферних опадів, що випадають на поверхню проїзної частини та узбіч в періоди сезонного вологонакопичення. Це дозволяє розробити якісні заходи, що покращують водно-тепловий режим земляного полотна, змоделювати його конструкцію з урахуванням властивостей ґрунтів, підвищити міцність за рахунок збільшення ступеня щільності ґрунтів та зменшення шкідливого впливу інфільтрації вологи.

Проблематика. Коефіцієнти вологопровідності ґрунту земляного полотна отримані за існуючим методом І.А. Золотаря та за міжнародним стандартом ISO 17892-11:2019 (E) мають як різні значення, так і різні одиниці вимірювання, що створює суттєві проблеми для їх подальшого практичного використання. Тому виникає ряд актуальних задач щодо адаптації існуючих методів з визначення вологонакопичення протягом річного циклу до європейських стандартів вимірювання коефіцієнта вологопровідності ґрунтів земляного полотна.

Мета. Метою даної роботи є проведення аналізу існуючих методів визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів для розрахунку сезонного вологонакопичення в земляному полотні.

Матеріали та методи. Методи визначення коефіцієнта вологопровідності, зокрема метод Золотаря І.А., використовують переважно в країнах пострадянського простору. У той же час, у країнах Європейського Союзу визначення коефіцієнта вологопровідності регламентує міжнародний стандарт ISO 17892-11:2019 (E), згідно якого коефіцієнт вологопровідності визначають залежно від умов проведення експерименту.

У навчально-науковій лабораторії кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету було проведено серію досліджень з використанням обладнання для випробування на вологопровідність в умовах змінного напору.

Результати. На основі отриманих результатів експериментальних досліджень, виконаних в науково-дослідній лабораторії Національного транспортного університету визначено коефіцієнт вологопровідності супіщаного ґрунту за міжнародним стандартом ISO 17892-11:2019 (E) та проведено порівняння з розрахованим коефіцієнт вологопровідності за методом І.А. Золотаря.

Висновки. На основі отриманих результатів експериментальних досліджень за європейським підходом з визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів земляного полотна буде удосконалено метод розрахунку сезонного вологонакопичення. Це дасть можливість відійти від застарілих радянських методик, вирішити низку питань, важливих для практики проєктування, будівництва, відновлення, реконструкції та експлуатації автомобільних доріг: оцінити придатність місцевих ґрунтів для влаштування земляного полотна; визначити його конструктивні параметри; встановити розрахункові значення міцнісних і деформативних характеристик ґрунту.

Ключові слова: автомобільна дорога, вологість ґрунту, вологонакопичення, вологообмін, ґрунт, земляне полотно, коефіцієнт вологопровідності.

Вступ

Найбільш актуальною проблемою в дорожній галузі залишається виникнення деформацій і руйнувань покриттів. Переважно приділяється увага якості, властивостям матеріалів і технології влаштування шарів дорожнього одягу. Але однією з причин виникнення деформацій і руйнувань дорожнього одягу може бути також недостатня міцність його основи та робочого шару земляного полотна.

Стан дорожньої конструкції і строк її служби пов'язані не тільки з якістю технології влаштування на стадії будівництва, а і з особливостями водно-теплового режиму на ділянці дороги, що обумовлює зміну в часі та по глибині щільності і вологості ґрунту земляного полотна. Процеси, які відбуваються у дорожній конструкції, пов'язані з тепло- та вологообміном між дорожнім покриттям і приземним повітрям, інфільтрацією опадів у земляне полотно через тріщини в дорожньому одязі та узбіччя.

У роботі [1] запропоновано метод визначення показників вологообміну ґрунту на основі лабораторних досліджень, що дозволяє оцінити сумарне випаровування за добу при відомій змінній вологості. Дослідження роботи морозозахисної конструкції, яка виконує теплоізолюючу функцію в робочій зоні земляного полотна, представлено у роботі [2]. Авторами доведено тісний зв'язок між процесами деформації земляного полотна залізниці із сезонною зміною водно-теплового режиму в тілі насипу. Складність проєктування та будівництва транспортних споруд в районах із сезонним промерзанням ґрунтів пов'язана з морозним здиманням, що призводить до внутрішньооб'ємних деформацій в земляному полотні та, відповідно, суттєво впливає на безпеку руху. У роботі [3] узагальнено наявні результати досліджень процесу морозного здимання та протиморозних заходів у конструкції земляного полотна залізниць.

Тонкошарові асфальтобетонні покриття є найпоширенішими в Австралії та Новій Зеландії. Робота багатьох ділянок доріг відбувається в умовах сезонного інтенсивного вологообміну між навколишнім середовищем і дорожньою конструкцією. Зміни кліматичних факторів, таких як опади, атмосферна температура, випаровування, відносна вологість і рівень ґрунтових вод, спричиняють часові зміни вологості шарів дорожнього покриття. Ці часові зміни вологості впливають на втрати міцнісних характеристик всієї дорожньої конструкції. У роботі [4] запропонована модель для прогнозування можливих часових коливань вологості протягом строку експлуатації, ступеня насичення вологою та критичного параметра, який визначає утворення колійності дорожнього покриття. Модель дозволяє зімітувати потік вологи, пари та тепла через шари дорожнього одягу, використовуючи 1-D числове моделювання. Також встановлено, як впливає зміна рівня ґрунтових вод на вологообіг у тілі земляного полотна.

Дослідження процесів вологообміну та вологонакопичення в дорожній конструкції, наслідки від їх впливу обумовлюють новий напрямок досліджень з визначення показників вологопровідності ґрунту для обґрунтованого проєктування конструкцій земляного полотна.

Метою даної роботи є проведення аналізу існуючих методів визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів на основі закону перенесення вологи в земляному полотні та експериментальних досліджень.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– провести аналіз методу визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунту, спираючись на закон стаціонарного та нестаціонарного вологообміну;

– провести аналіз методу визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунту за європейським підходом, залежно від умов проведення експериментальних досліджень.

Основна частина

Усі періоди зволоження дорожньої конструкції складають єдиний закономірний цикл руху вологи в ґрунтах земляного полотна внаслідок впливу на нього природних факторів навколишнього середовища. Притік вологи за період осіннього накопичення визначається сумарною кількістю опадів, інтенсивністю та тривалістю їх випадіння, а також температурою і дефіцитом вологості повітря. При промерзанні ґрунту волога, що накопичується за осінній період, перерозподіляється завдяки силам кристалізації. При пониженні межі промерзання відбувається підтягування вологи із нижніх шарів ґрунту.

Загальний об'єм накопичення вологи у зимовий період визначають за залежністю, згідно з [5]:

$$Q_{\text{ЗН}} = \frac{K_1 \cdot \left(W_{\text{ПВ}} - W_{\text{h}}\right)}{\beta \cdot \gamma \cdot \alpha_0} \cdot z_{\text{пр}} \cdot \left(H_0 - z_{01}\right) \cdot \left\{ \left(\gamma \cdot \frac{1 - z_{01}}{H_0 - z_{01}} - 1 \right) \cdot \exp\left[\gamma \cdot \frac{1 - z_{01}}{H_0 - z_{01}} - 1 \right] + \exp\left(-\gamma\right) \right\}, \quad (1)$$

де K_1 — коефіцієнт капілярної вологопровідності ґрунту (визначають експериментально за методикою [5]), см²/добу;

$W_{\text{ПВ}}$ — повна вологоємність ґрунту, долі одиниці;

W_{h} — вологість ґрунту на межі льодоутворення, долі одиниці;

β та γ — коефіцієнти, що характеризують перерозподіл вологи ($\beta = 0{,}125$ та $\gamma = 2{,}8$);

α_0 — кліматичний показник, см²/добу;

$z_{\text{пр}}$ — загальна глибина промерзання дорожньої конструкції, см;

H_0 та z_{01} — безрозмірні величини, що визначають за залежностями, відповідно:

$$H_0 = \frac{H_{\text{ГВ}}}{z_{\text{пр}}}, \quad z_{01} = \frac{z_1}{z_{\text{пр}}};$$

$H_{\text{ГВ}}$ — рівень ґрунтових вод, см;

z_1 — товщина шарів дорожнього одягу із стабільних матеріалів, см.

Переважна більшість розроблених до теперішнього часу методів визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів базуються на законі перенесення вологи [6]:

$$i = K_1 \gamma_{\text{ск}} \left(\frac{\partial W}{\partial x} + \delta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right), \quad (2)$$

де i — потік вологи через одиничну площадку за одиницю часу;

K_1 — коефіцієнт вологопровідності;

$\gamma_{\text{ск}}$ — об'ємна вага скелета ґрунту;

$\frac{\partial W}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial x}$ — відповідно градієнти вагової вологості та температури;

δ — термоградієнтний коефіцієнт.

При ізотермічних умовах $\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$ співвідношення (2) набуває вигляду:

$$i = K_1 \gamma_{\text{ск}} \frac{\partial W}{\partial x}. \quad (3)$$

Якщо ж враховувати градієнт не вагової, а об'ємної вологості, то:

$$i = K\frac{\partial W}{\partial x}. \tag{4}$$

Залежно від характера величини i розрізняють дві основні групи методів визначення коефіцієнтів вологопровідності:

1) стаціонарного вологообміну ($i = const$);

2) нестаціонарного вологообміну ($i \neq const$).

Основна складність при визначенні коефіцієнта вологопровідності K полягає у тому, що його значення в свою чергу теж залежить від вологості ($K = f(W)$). Тому використовується зональний метод визначення коефіцієнта вологопровідності K для вузького інтервалу зміни вологості ґрунту, у межах якого можна прийняти $K = const$, або визначається середнє значення K для всього інтервалу зміни вологості ґрунту в досліді. У рамках даного підходу, отримавши дані про K в кількох інтервалах зміни вологості, можна зробити висновок про характер функції $K = f(W)$ у всьому діапазоні зміни вологості ґрунту.

При визначенні коефіцієнта вологопровідності K методами стаціонарного вологообміну ґрунтовий зразок у формі циліндра зволожується знизу водою, яка може випаровуватися через верхню поверхню зразка. Для забезпечення ізотермічних умов спеціальна експериментальна установка із зразком розташовується в термостаті. Поява сталості ваги приладу зі зразком (у деяких установках прилад підвішений в термостаті до одного із важелів технічних терезів) свідчить про настання стаціонарного вологообміну (надходження рідкої вологи у зразок дорівнює обсягу випаровування). Потім зразок розрізається на шари, визначається пошарова вологість ґрунту і за графіком вологості знаходять значення $\frac{\partial W}{\partial x}$ її градієнта. При досить вузькому діапазоні зміни вологості ґрунтового зразка в досліді коефіцієнт вологопровідності K не буде залежати від вологості ґрунту і розподіл по осі ґрунтового циліндра буде лінійним; в іншому випадку — розподіл вологості матиме форму кривої. Тоді графічним диференціюванням визначають $\frac{\partial W}{\partial x}$ для різних фіксованих значень W і за формулою (4) — величини K для цих значень W. Необхідний для розрахунків потік вологи i встановлюють попередньо за кількістю води, яка витрачається за одиницю часу для підтримання в ході досліду постійного рівня води у посудині під нижньою поверхнею зразка або за фіксованою інтенсивністю випаровування.

Відповідні експериментальні установки Мініовича Я.М., Максимова Г.Л і Дубницького В.І. описані в роботі Ликова А.В. Недоліком методик визначення коефіцієнта вологопровідності K в стані стаціонарного вологообміну є довготривалість дослідів (до 1 500 год), обумовлена необхідністю досягнення стаціонарного стану. Тому більш широкого застосування і розвитку отримали методи визначення коефіцієнта вологопровідності K в умовах нестаціонарного вологонакопичення. Найбільш простим із цих методів є метод інтегральної обробки кривих вологості ідентичних зразків, які насичувалися за різний час. Розрахунки коефіцієнта вологопровідності проводяться за формулою:

$$\left[K\Delta\tau\right]_n = \frac{\left[\Delta\Phi_{\Delta\tau}\right]_n}{\Delta\tau\left[\left(\frac{W}{h}\right)_{\Delta\tau}\right]_n}, \tag{5}$$

де $[K\Delta\tau]_n$ — середнє значення коефіцієнта вологопровідності в n-му перетині в інтервалі часу $\Delta\tau$, до початку та кінця якого відносяться криві вологості [6];

$\left[\Delta\Phi_{\Delta\tau}\right]_n$ — площа між двома суміжними кривими вологості на ділянці від h_n до H (H — повна висота зразка). Найбільш доцільно визначати цю площу планометруванням;

$\Delta\tau\left[\left(\frac{W}{h}\right)_{\Delta\tau}\right]_n$ — середній градієнт вологості в зоні розглянутого перетину; визначається як середньоарифметичний на ділянках обох епюр в зоні розглянутого перетину.

Передумовою застосування формули (5) є відсутність виходу води за межі ґрунтового зразка при його зволоженні.

З метою спрощення методики визначення коефіцієнта вологопровідності K Золотарь І. А. запропонував обчислювати його значення за кількістю вологи q, яка вбирається через одиницю поверхні зразка за певний час τ за формулою:

$$K = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{q^2}{\Delta W_{\text{ПВ}}^2 \tau}, \tag{6}$$

де $\Delta W_{\text{ПВ}} = (W_{\text{ПВ}} - W_0)$ — об'ємна вологість ґрунту біля поверхні, через яку проводиться зволоження;

$W_{\text{ПВ}}$ — об'ємна вологість ґрунту біля поверхні, через яку проводиться зволоження;

W_0 — початкова об'ємна вологість ґрунтового зразка.

Формула (6) отримана інтегруванням рішення для поля вологості напівнескінченного ґрунтового масиву:

$$\Delta W_x = \Delta W_{\text{ПВ}}\left(1 - erf\,\frac{x}{2\sqrt{K\tau}}\right). \tag{7}$$

Тоді,

$$q = \int_{x=0}^{\infty} \Delta W_x\, dx = \Delta W_{\text{ПВ}} \int_{x=0}^{\infty}\left(1 - erf\,\frac{x}{2\sqrt{K\tau}}\right) dx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \Delta W_{\text{ПВ}} \sqrt{K\tau}. \tag{8}$$

Визначаючи з останнього співвідношення K, отримаємо формулу (6). Розрахунок K з (6) ґрунтується вже не тільки на законі (4), але і на залежності (7). Тому даний спосіб обчислення K більш наближений, ніж метод інтегральної обробки і достовірний лише в тій мірі, в якій формула (7) описує поле вологості в напівнескінченному ґрунтовому масиві.

Формулу (6) можна звести до такого вигляду, зручного для практичного використання, м^2/с:

$$K = \frac{4}{10^4 \pi d^4 \Delta t}\left(\frac{m_2}{\rho_c\left(W_{\text{ПВ}} - W_0\right)}\right)^2, \tag{9}$$

де d, l — відповідно діаметр та довжина (висота) зразка, см;

$m_{\text{в}}$ — маса води, що увібралася в зразок за проміжок часу Δt;

W_0, $W_{\text{ПВ}}$ — відповідно початкова та повна вологоємність ґрунту;

$\rho_{\text{с}}$ — щільність сухого ґрунту, г/см^3.

Щільність сухого ґрунту $\rho_{\text{с}}$ та повну вологоємність ґрунту $W_{\text{ПВ}}$, що входять у формулу (9) можна визначити із співвідношень:

$$\rho_{\text{с}} = \frac{m_0}{V\left(1 + W_0\right)},\ V = \frac{\pi d^2}{4} l, \tag{10}$$

$$W_{\text{ПВ}} = \frac{1}{\rho_{\text{с}}} - \frac{1}{\rho_{\text{г}}}, \tag{11}$$

де $\rho_{\text{г}}$ — щільність часток ґрунту, що приймається: для супісків — 2,68 г/см^3; для суглинків — 2,7 г/см^3; для глин — 2,72 г/см^3.

Слід відмітити, що вищеописані методи визначення коефіцієнта вологопровідності, зокрема метод Золотаря І.А. , використовують переважно в країнах пострадянського простору.

У той самий час, у країнах Європейського Союзу (ЄС) визначення коефіцієнта вологопровідності регламентує міжнародний стандарт ISO 17892-11:2019 (E) [7], згідно з якого коефіцієнт вологопровідності визначають залежно від умов проведення експерименту за формулами:

– для умов експериментального випробовування з постійним напором та постійною витратою, м/с:

$$K = \frac{Q}{A \cdot i}, \tag{12}$$

$$Q = \frac{\Delta m}{\Delta t \cdot \rho} = \frac{m_1 - m_0}{\Delta t \cdot \rho}, \; i = \frac{\Delta h}{l}, \tag{13}$$

де Q — витрата води, що проходить через зразок за одиницю часу, г/с;
l — довжина (висота) експериментального зразка, м;
A — площа поперечного перерізу експериментального зразка, м^2;
i — гідравлічний градієнт зразка;
Δh — різниця напорів води між точками вимірювання, м;
m_0, m_1 — відповідно початкова маса та маса водонасиченого зразка, г;
Δt — час водонасичення зразка, с;
ρ — щільність води, г/м^3.

– для умов експериментального випробовування зі зростаючим нижнім б’єфом при спадаючому напорі, м/с:

$$K = \frac{a_{in} \cdot a_{out}}{(a_{in} + a_{out})} \cdot \frac{l}{A \cdot \Delta t} \cdot \ln\left(\frac{\Delta h_{t_1}}{\Delta h_{t_2}}\right), \tag{14}$$

де a_{in}, a_{out} — площі поперечного перерізу відповідно впускної та випускної труб, м^2;
Δh_{t_1}, Δh_{t_2} — напір води над рівнем витоку відповідно в моменти часу t_1, t_2, м.

– для умов експериментального випробовування із постійним нижнім б’єфом при спадаючому напорі, м/с:

$$K = \frac{a_{in} \cdot l}{A \cdot \Delta t} \cdot \ln\left(\frac{\Delta h_{t_1}}{\Delta h_{t_2}}\right). \tag{15}$$

Нижче наведено результати розрахунків коефіцієнта вологопровідності супіщаного ґрунту за методом Золотаря І.А. та за міжнародним стандартом ISO 17892-11:2019 (E), отримані на

основі результатів експериментальних досліджень, виконаних в науково-дослідній лабораторії Національного транспортного університету (**табл. 1**).

Таблиця 1

Розрахункові значення коефіцієнта вологопровідності супіщаного ґрунту за методом Золотаря І.А. та за міжнародним стандартом ISO 17892-11:2019 (E)

Методи обчислення	Метод І.А. Золотаря	Міжнародний стандарт ISO 17892-11:2019 (E)
Одиниці вимірювання	$м^2/с$	м/с
Значення коефіцієнта вологопровідності	$7{,}66 \cdot 10^{-7}$	$1{,}75 \cdot 10^{-8}$

Для розрахунку прийняті такі вихідні дані:
1. Різновид ґрунту — супісок (Миколаївська область).
2. Тип умов випробування: «Постійний нижній б'єф при спадаючому напорі».
3. Температура проникаючої води T_{test} = 18 °C.
4. Діаметр зразка d = 0,096 м.
5. Відстань між точками вимірювання у напрямку потоку l = 0,12 м.
6. Початкова маса зразка m_0 = 2289 г.
7. Маса водонасиченого зразка m_1 = 2389 г.
8. Початкова вологість зразка W_0 = 0,12.
9. Діаметр впускної труби d_{in} = 0,006 м.
10. Напір води над рівнем витоку в момент часу t_1 — $\Delta h_{t_1} = 0{,}71$ м.
11. Напір води над рівнем витоку в момент часу t_2 — $\Delta h_{t_2} = 0{,}70$ м.
12. Час водонасичення Δt = 380 с.

Як видно з даних **табл. 1**, коефіцієнти вологопровідності, отримані за методом Золотаря І.А. та за міжнародним стандартом ISO 17892-11:2019 (E), мають як різні значення, так і різні одиниці вимірювання, що створює суттєві проблеми для їх подальшого практичного використання. Тому виникає актуальна проблема щодо адаптації існуючих методів з визначення вологонакопичення протягом річного циклу до європейських стандартів вимірювання коефіцієнта вологопровідності ґрунтів земляного полотна, що і буде наступним напрямком роботи авторів.

Висновки

На основі наступних результатів експериментальних досліджень за європейським підходом з визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів земляного полотна буде удосконалено метод розрахунку сезонного вологонакопичення. Це дасть можливість відійти від застарілих радянських методик, вирішити низку питань, важливих для практики проєктування, будівництва, відновлення, реконструкції та експлуатації автомобільних доріг: оцінити придатність місцевих ґрунтів для влаштування земляного полотна; визначити його конструктивні параметри; встановити розрахункові значення міцносних і деформативних характеристик ґрунту.

Список літератури

1. Nien-Ming Hong, Ching-Pin Tung & Chu-hui Chen A procedure to estimate cover coefficient and parameters of soil moisture stress function using soil moisture monitoring data. *Paddy and Water Environment* 2013. Volume 11, P. 255–264. DOI: https://10.1007/s10333-012-0315-5.

2. BowenTai, ZurunYue,TiechengSun, Shouchen Qi, Lei Li, ZhihaoYang Novel anti-frost subgrade bed structures a high speed railways in deep seasonally frozen ground regions: Experimental and numerical studies/ *Construction and Building Materials. Volume 269*, 1 February 2021, 121266. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121266.

3. Shuang Jia, BoWen Tai, Shou Chen Qi, Lei Li, Tao Chen Summary of research on frost heave for subgrade in seasonal frozen ground. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021, Vol. 13 . Issue (3). P. 195–205. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.20092.

4. Chathuri Maha Madakalapuge,Troyee Tanu Dutta, Didier Bodin, Jayantha Kodikara Numerical evaluation of temporal moisture variations in unbound pavements with thin seals. *Transportation Geotechnics. Volume 35*, July 2022, 100787. DOI: 10.1016/j.trgeo.2022.100787.

5. МР В 2.3-02070915-849:2014 Методичні рекомендації щодо регулювання водно-теплового режиму у межах робочого шару земляного полотна автомобільних доріг. Київ, 2014. 61 с. (Інформація та документація).

6. Н.А. Пузаков, И.А. Золотарь, В.М. Сиденко, А.Я. Тулаев и др. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. *Транспорт.* 1971. 413 с.

7. EN ISO 17892-11:2019 Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 11: Permeability tests. URL: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/72016/6fc2a3e6996946c78f47359ed716af2c/ISO-17892-11-2019.pdf [in English].

References

1. Nien-Ming Hong, Ching-Pin Tung & Chu-hui Chen A procedure to estimate cover coefficient and parameters of soil moisture stress function using soil moisture monitoring data. *Paddy and Water Environment* 2013. Volume 11, P. 255–264. DOI: 10.1007/s10333-012-0315-5 [in English].

2. BowenTai, ZurunYue,TiechengSun, Shouchen Qi, Lei Li, ZhihaoYang Novel anti-frost subgrade bed structures a high speed railways in deep seasonally frozen ground regions: Experimental and numerical studies/ *Construction and Building Materials. Volume 269*, 1 February 2021, 121266. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121266 [in English].

3. Shuang Jia, BoWen Tai, Shou Chen Qi, Lei Li, Tao Chen Summary of research on frost heave for subgrade in seasonal frozen ground. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021, Vol. 13 . Issue (3). P. 195–205. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.20092 [in English].

4. Chathuri Maha Madakalapuge,Troyee Tanu Dutta, Didier Bodin, Jayantha Kodikara Numerical evaluation of temporal moisture variations in unbound pavements with thin seals. *Transportation Geotechnics. Volume 35*, July 2022, 100787. DOI: 10.1016/j.trgeo.2022.100787 [in English].

5. MR V 2.3-02070915-849:2014 Metodychni rekomendatsiyi shchodo rehulyuvannya vodno-teplovoho rezhymu u mezhakh robochoho sharu zemlyanoho polotna avtomobil′nykh dorih [Methodical recommendations on regulation of water-thermal regime within the working layer of the road subgrade]. Kyiv, 2014. 61 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

6. N.A. Puzakov, I.A. Zolotar, V.M. Sidenko, A.YA. Tulayev i dr. Vodno-teplovoy rezhim zemlyanogo polotna i dorozhnykh odezhd [Water-thermal regime of the subrade and road pavement]. *Transport*. 1971. 413 p. [in Russian].

7. EN ISO 17892-11:2019 Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 11: Permeability tests. URL: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/72016/6fc2a3e6996946c78f47359ed716af2c/ISO-17892-11-2019.pdf (Information and documentation) [in English].

Liudmyla Bondarenko, *Ph.D., Associate Prof., http://orcid.org/0000-0002-8239-065X*
Yevheniia Kvatadze, *graduate student, https://orcid.org/0000-0003-2798-8955*

National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

METHODS OF DETERMINING THE COEFFICIENT OF MOISTURE CONDUCTIVITY OF SOILS SUBGRADE

Abstract

Introduction. All periods of moistening of the road structure constitute a single regular cycle of moisture movement in it due to the influence of natural factors. For the final selection of the construction of the subgrade and road pavement, the values of density, humidity and frost heaving of the soil in the annual cycle should be established. To forecast these values, it is necessary to determine the amount of moisture entering the soil from precipitation falling on the surface of the roadway and roadsides during periods of seasonal moisture accumulation. This makes it possible to develop high-quality measures that improve the water-thermal regime of the soils of the subgrade, to model its construction taking into account the properties of the soil, to increase durability by increasing the degree of soil density and reducing the harmful effects of moisture infiltration.

Problem Statement. Coefficient of soil moisture conductivity of soil is obtained by the existing method I.A. Zolotar. According to the international standard ISO 17892-11:2019 (E), there are different values as well as different units of measurement, which creates significant problems for their further practical use. Therefore, there are a number of urgent problems regarding the adaptation of existing methods for determining moisture accumulation during the annual cycle to European standards for measuring the coefficient of moisture conductivity of soils of the subgrade.

Purpose. The purpose of this work is to carry out analysis of the existing methods of determination of soil moisture conductivity coefficient for calculation of seasonal moisture accumulation in the subgrade.

Materials and methods. Methods of determination of the coefficient of moisture conductivity, in particular The Method I.A. Zolotar, are used mainly in the countries of the post-Soviet space. At the same time, in the European Union countries, the determination of the coefficient of moisture is regulated by the international standard ISO 17892-11:2019 (E), according to which the coefficient of moisture is determined depending on the conditions of carrying of the experiment.

In the educational and scientific laboratory of the department of transport construction and property management of the National Transport University, a series of studies was conducted using equipment for testing moisture conductivity under conditions of constant pressure.

Results. Based on the obtained results of experimental studies carried out in the research laboratory of the National Transport University, the coefficient of moisture conductivity of sandy soil was determined according to the international standard ISO 17892-11:2019 (E) and a comparison was made with the coefficient of moisture conductivity calculated according to the method of I.A. Zolotar.

Conclusions. On the basis of the obtained results of experimental studies according to the European approach to determining the coefficient of electrical conductivity of soils of the subgrade, the method of calculating seasonal moisture accumulation will be improved. This will make it possible to move away from outdated Soviet methods, to solve a number of issues important for the practice of design, construction, restoration, reconstruction and operation of roads: to assess the suitability of local soils for the arrangement of the subgrade; determine its structural parameters; to establish calculated values of strength and deformation characteristics of the soil.

Keywords: road, soil moisture, moisture accumulation, moisture exchange, soil, subgrade, the coefficient of moisture.