

**IMPROVEMENT OF CALCULATION METHOD
OF ROAD PAVEMENT EMBANKMENT
ON THE APPROACHES TO ROAD BRIDGES**

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ
НАСИПУ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ НА ПІДХОДАХ
ДО АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ**

Vitalii Tsybulskiy¹

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-021-6-41>

Abstract. The laws of unsaturated and capillary movement of water in soils are analyzed, which are complex and insufficiently studied, but significantly affect the condition of the ground. Experience in the design and construction of the subsoil has shown that during the excavation works can significantly change the conditions of soils and their water-thermal regime. Therefore, the characteristics of soils used in stability calculations should be determined taking into account the subsequent condition of the soil in the conditions of occurrence, as well as the possible change of these conditions during construction and maintenance.

One of the urgent tasks is to improve the methods of regulating the water-thermal regime of roads. By changing the conditions of its course or the type of water-thermal regime itself, significant successes can be achieved in improving the maintenance of roads, engineering and transport facilities. Dangerous effect of these factors on the embankment of the ground is manifested in the formation of wetting, wetting of the soil and layers of pavement, resulting in reduced density, strength of soils, subsidence, swelling and loss of continuity due to cracking. As a result, the strength of the road structure, the flatness of the carriageway, the durability of the pavement and the adhesion of the wheels to the roadway are reduced. The most dangerous for roads are moisture accumulation, freezing, thawing of the ground, intensive heating and intensive cooling of the layers of pavement.

¹ Senior Lecturer, Department of Materials Resistance and Mechanical Engineering, National Transport University, Ukraine

The analysis of regularities of formation of a water-thermal regime of a ground and its regulation at the expense of the device of optimum capillary-interrupting layers is carried out. The laws of soil moisture when raising capillary water showed that when the layer of the embankment with a high coefficient of impregnation is dehydrated over the layer with a lower coefficient, the speed of moving capillary water into the upper soil layers drops sharply. This fall occurs as a result of changes in the relationship between the driving forces of the menisci and the forces of resistance of capillary water in the soil.

The process of unsaturated movement of water in the soil is determined by the combination of many factors that characterize the capillary system of the soil. The calculation uses complex indicators of soil water movement conditions, which are established experimentally for each variety and soil density at optimal humidity, as well as water filtration coefficients in the soil. To establish the relationship between these experimental data and the required values that determine the capillary system of the soil, the filtration of water in the soil was considered. Determining the optimal capillary system of the soil and establishing the unstable distribution of own capillary water in the structures of high embankments will ensure the strength of approaches to road bridges.

The method of calculating the determination of the optimal composition of the road layers taking into account the processes of water-thermal regime and capillary movement of water has been improved. The algorithm of calculation in the program Microsoft Excel for selection of optimum structure of a ground cloth of a high embankment on approaches to automobile bridges is offered.

1. Вступ

Земляне полотно дороги є ґрунтовою основою для дорожнього одягу, тому воно повинне бути міцне та стійке незалежно від погод-но-кліматичних умов місцевості та періоду року. Під стійкістю розу-міють збереження передбаченого проектом положення в просторі без зсувів та осідання.

Земляне полотно необхідно проектувати в комплексі з дорожнім одягом. Проектуючи земляне полотно слід мати на увазі, що в наслідок будівництва споруд або виконання земляних робіт можуть від-

чутно змінитись умови залягання ґрунтів та їхній водно-тепловий режим [1–2].

Характеристики ґрунтів, які використовують у розрахунках стійкості, необхідно визначати з урахуванням наступного стану ґрунтів в умовах залягання, а також можливої зміни цих умов під час будівництва та експлуатації. Закони ненасиченого руху води в ґрунтах дуже складні та недостатньо вивчені, але значно впливають на стійкість, міцність, пучення земляного полотна [3].

Метою даного дослідження є аналіз основних процесів у земляному полотні та оптимізація конструкції шарів високого насипу на основі розподілу капілярної води в тілі земляного полотна.

Відповідно до мети були поставлені наступні задачі:

- провести аналіз закономірностей формування водно-теплого режиму земляного полотна та методів його регулювання за рахунок влаштування капілярно-перериваючих шарів;
- дослідити та удосконалити методику знаходження оптимальної капілярної системи шаруватих ґрунтів та розподілу капілярної води в тілі земляного полотна;
- визначити оптимальну капілярну систему ґрунту та встановити несталий розподіл власно-капілярної води в конструкціях високих насипів, на об'єктах дорожньо-транспортного комплексу.

2. Закономірності формування водно-теплого режиму

Під водно-тепловим режимом дороги розуміють закономірності зміни вологості і температури в будь-якій точці полотна і одягу в річному періоді [4].

Процес формування водно-теплого режиму доріг пов'язаний з закономірностями міграції у ґрунті різних видів вологи (вільної, паро-подібної, зв'язаної та інші).

Кристалічна форма води є результатом фазового переведу вільної води в кристалічну. Цей перехід протікає при 0°C , особливістю якого є те, що обсяг кристалічної форми води складає близько 1,09 від вільної. Вода в кристалічній формі не мігрує. Зворотній фазовий процес протікає при температурі більше 0°C внаслідок теплообміну між середовищем і кристалічною формою води.

Для розв'язання практичних задач експлуатації доріг було запропоновано умовно розділити вирішення цієї задачі на окремі етапи [3]:

а) допускаючи, що в окремих територіальних зонах хід температурних полів можна прийняти за стаціонарний, розділити територію країни на окремі температурні райони з адекватними ґрунтово-гідрологічними умовами;

б) вивчати як дискретний процес зміни вологи ґрунтів в межах кожного району, базуючись на початковому процесі волого накопичення і на фактичному для району процесі змін температурних полів (з урахуванням властивостей ґрунтів).

Процес початкового накопичення вологи визначається потужністю та тривалістю дії джерел зволоження. На практиці розрізняють чотири основні групи джерел зволоження (рис. 1):

1) зволоження дорожньої конструкції атмосферними водами. Джерелами зволоження тут можуть бути не суцільність дорожнього покриття (втрата суцільності внаслідок тріщинуватості чи взагалі водопроникна структура покриття), дефекти зони спряження проїзної частини з узбіччям, просочування в зоні узбіччя та ухилів тощо;

2) незабезпеченість поверхневого стоку. Земляне полотно зволожується за рахунок насичення ґрунту водою і капілярного підняття. Треба пам'ятати, що при відносно довгому стоянні вод в бічних водовідвідних системах в земляному полотні формується тимчасова крива дисперсії з стрілою f , завдяки якій полотно може зволожуватись аж до підшови одягу;

3) зволоження конструкції за рахунок капілярного підняття. Ця група джерел зволоження значима тоді, коли рівень капілярного підняття заходить в межі глибини активної зони;

4) зволоження пароподібною і плівковою водою. Ця група джерел найбільш підступна. З одного боку, процес зволоження у цьому випадку візуально не контролюється і внаслідок цього на практиці важко діагностується. З другого – група зволоження приводить, як правило, до спонтанного руйнування дорожньої конструкції.

В залежності від фактичного поєднання груп зволоження розрізняють декілька видів водно-теплого режиму:

1) Якщо поєднуються групи перша та четверта або друга та четверта, або існує тільки перша група джерел зволоження чи тільки четверта,

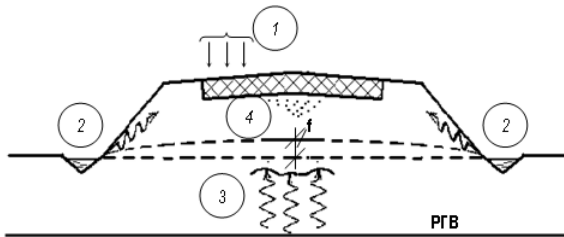


Рис. 1. Основні групи джерел зволоження дорожньої конструкції

то такий водно-тепловий режим називається дифузно-плівковим. Якщо мають місце друга чи третя групи джерел зволоження або їх поєднання, а рівень капілярного підняття заходить в межі глибини активної зони, то такий вид водно-теплого режиму називається капілярним. Цей вид водно-теплого режиму в цілому несприятливий для доріг. Більш-менш задовільну роботу ділянок доріг з цим видом ВТР можна пояснити тільки надто прискіпливою увагою дорожньої служби до цих ділянок.

2) Якщо має місце тільки перша група джерел зволоження, а в тілі насипу (йдеться про високі насипи, незалежно від місця їх дислокації) існує ґрунтовий шар з характеристиками фільтрації, гіршими за такі для вище розташованих ґрунтових шарів, то такий водно-тепловий режим називається інфільтраційним. Особливістю цього водно-теплого режиму є те, що внаслідок наявності в насипі шару відносного водоупору формується довгострокове зависання в насипні значної кількості вологи, яка перетворюється у власне постійне джерело зволоження ґрунту насипу. Такі насипи працюють нестабільно, зумовлюють безперервний процес деформування дорожньої конструкції. Ліквідувати технічними рішеннями цей вид водно-теплого режиму практично неможливо, можна говорити тільки про способи покращення умов його протікання. Передумовою до виникнення цього виду водно-теплого режиму є недостатня увага і недбайливість при виконанні робіт по влаштуванню високого насипу.

3. Дослідження розподілу капілярної води

Закони ненасиченого руху води в ґрунтах досить складні і вивчені недостатньо. Найбільшими труднощами є прогнозування руху води в

шаруватих ґрунтах і особливе переміщення капілярно-підвищеної води в умовах втрати вологи при випаровуванні. У цьому плані представляє інтерес робота Дж. Рубіна, в якій на основі моделі потоку води в ґрунті по Дарсі аналізується перерозподіл вологи після інфільтрації в напів нескінченних вертикальних колонках ґрунту. Запропонований ним метод розрахунку включає більше число емпіричних залежностей і близько десятка емпіричних констант, отриманих для конкретних умов, що обмежує можливість його використання для практичних цілей. Розглянемо теорію і метод розрахунку переміщення власної капілярної і капілярно-підвищеної води в шаруватих ґрунтах земляного полотна [5].

Парова мережа ґрунту в інтервалі вологості від оптимальної до капілярної вологоємкості може бути представлена системою капілярів, що складається з чотирьох груп, кожна з яких об'єднує капіляри однакового поперечного перетину. Між окремими капілярами є співвідношення: $\omega_K^I < \omega_K^{II} < \omega_K^{III} < \omega_K^{IV}$ (ω_K – площа поперечного перерізу капіляра; I, II, III, IV – номери груп капілярів). В той же час прийнято, що суми площ перетинів капілярів всіх груп рівні.

Тоді для шару ґрунту з площею поперечного перетину $\bar{\omega}_{zp} = 1 \text{ м}^2$ сума площ поперечних перетинів капілярів, що відносяться до однієї групи (в м^2) буде:

$$\bar{\omega}_K = \frac{(W_{KB} - W_{OPT})}{4} \cdot \frac{\rho_{СК}}{\rho_B} \bar{\omega}_{ГР}, \quad (1)$$

де W_{OPT} – оптимальна вологість ґрунту, долі одиниці;

ρ_B – щільність води, кг/м^3 .

У окремий капіляр парової системи ґрунту вода надходить двома шляхами: по самому капіляру від горизонту поверхневих або ґрунтових вод та із крупніших капілярів. Відповідно до цього епюра вологості ґрунту може розглядатися як функція припливу вологи за системою ізольованих та сполучених капілярів. Капілярна вода в ґрунті перебуває під дією рушійних сил менісків, сил опорів руху води, ваги капілярної води, сил інерції, тиску води, що знаходиться на поверхні ґрунту, атмосферного тиску та тиску повітря в ґрунті.

Як показують дослідження, в ґрунтах земляного полотна практично не відбувається стиснення повітря перед фронтом просоченої води (відсутність повітряного підпору і суцільного шару води на поверхні

дозволяє повітрю вільно переміщатися в ґрунті та виходити із земляного полотна). В цьому випадку можна прийняти, що тиск повітря в ґрунті рівний атмосферному [6].

Аналіз показує, що інерційні сили дуже малі в порівнянні з іншими силами, що діють на капілярну воду. Винятком є початковий момент просочування, коли прискорення порівняно велике та сили інерції по величині наближені до інших сил. Незважаючи на початковий момент просочування, інерційними силами можна нехтувати. З врахуванням цих допущень розглянемо рух власно-капілярної води по вертикальному капіляру з постійним поперечним перетином (рис. 2 а). Для такого капіляра складемо рівняння рівноваги сил, що діють на воду, для чого спроекуємо ці сили на вісь по напрямку руху вод:

$$Q_K + F_h \pm F_K - T_K = 0, \quad (2)$$

де Q_K – рушійна сила меніска, Н;

F_h – вага води на поверхні ґрунту, Н;

F_K – вага капілярної води, Н;

T_K – сила опору руху води в ґрунті, Н.

Рушійна сила меніска:

$$Q_K = q_K \cdot \omega_K, \quad (3)$$

де q_K – питома рушійна сила меніска, Па;

ω_K – площа поперечного перетину капіляра, м².

Враховуючи формулу Лапласа і залежність поверхневого натягу води від температури

$$q_K = q_{K(10)}(1 - 0,002\theta_B), \quad (4)$$

де $q_{K(10)}$ – питома рушійна сила меніска при 10°C, Па (вибір цієї температури обумовлений тим, що до неї прийнято відносити значення коефіцієнта фільтрації);

θ_B – температура води в ґрунті °С.

З теоретичних досліджень виходить, що при русі води в ґрунті форма меніска не спотворюється, відсутній або незначний гістерезис змочування при оптимальній вологості і вище за неї [5].

На підставі цього аналізу зроблено допущення, що в капілярі постійного поперечного перерізу: $q_K = const$ *нпу* $\theta_B = const$.

У зв'язних ґрунтах спостерігається ламінарний рух води. Такий режим характерний і для зернистого однорідного ґрунту із зернами

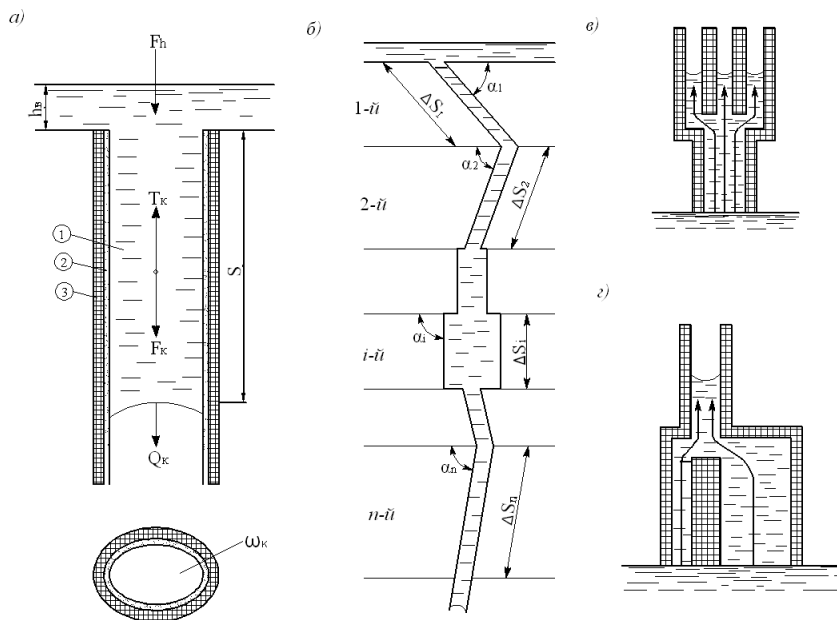


Рис. 2. Розрахункова схема до виводу рівняння руху власної капілярної води:

1 – капілярна вода; 2 – зв’язана вода; 3 – ґрунтові частинки

дрібніше 0,5 мм. У цих випадках опір руху води залежить від швидкості в першому ступені. З врахуванням цієї залежності отримаємо:

$$T_k = f_k w_k v; \quad (5)$$

$$w_k = \omega_k S; \quad (6)$$

$$K_w = \rho_B g / f_k. \quad (7)$$

де f_k – сила опору руху 1 м^3 води при швидкості, рівній 1 м/с ;

w_k – об’єм води в капілярі, м^3 ;

v – швидкість води в капілярі, м/с ;

S – довжина капіляра, заповненого водою, м ;

K_w – коефіцієнт просочування, м/с ;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

Існує прямий зв'язок між коефіцієнтами просочування і фільтрації. Це дозволяє виразити залежність коефіцієнта просочування від температури в тому ж виді, що і для коефіцієнта фільтрації:

$$K_w = K_{w(10)} (0,7 + 0,03\theta_B) . \quad (8)$$

де $K_{w(10)}$ – коефіцієнт просочування при температурі 10 °С, м/с.

Відповідно до рис. 2а вираз для визначення інших складових рівняння рівноваги сил:

$$F_K = \rho_B g S \omega_K ; \quad (9)$$

$$F_h = \rho_B g h_B \omega_K , \quad (10)$$

де h_B – товщина шару води на поверхні, м.

Ввівши в рівняння (2) вирази (3-10), отримаємо після перетворення формулу для визначення швидкості переміщення води у вертикальному капілярі постійного поперечного перетину:

$$v = K_w [q_K / (\rho_B g) + h_B \pm S] / S . \quad (11)$$

Розглянемо переміщення власно-капілярної води по поровій системі ґрунту. Заздалегідь складемо рівняння рівнодії сил, що діють на воду в криволінійному капілярі перемінного поперечного перерізу (рис. 2б):

$$g_{K(n)} \omega_{K(n)} + \rho_B g \omega_{K(n)} h_B - \rho_B g \omega_{K(n)} \sum_{i=0}^{i=n} \Delta S_{(i)} \sin \alpha_{(i)} - \rho_B g \sum_{i=0}^{i=n} \frac{w_{K(i)}}{K_{w(i)}} \cdot \Delta S_{(i)} v_{(i)} = 0, \quad (12)$$

де n – число прямолінійних ділянок капіляра постійного поперечного перетину на шляху, пройденим водою;

i – індекс ділянки капіляра;

$g_{K(n)}$ – питома рушійна сила меніска на i -тої ділянці капіляра, Па;

$K_{w(i)}$ – коефіцієнт просочування на i -тої ділянці капіляра, м/с;

v_i – швидкість переміщення води на i -тої ділянці капіляра, м/с;

$\omega_{K(n)}, \omega_{K(i)}$ – площі поперечного перетину відповідно на n -ної і i -тої ділянках капіляра, м²;

$\Delta S_{(i)}$ – довжина i -тої ділянки капіляра;

α – кут між віссю по напрямку руху води на i -тої ділянки капіляра та горизонтальним радіусом тригонометричного кола, град (знак функції $\sin \alpha$ залежить від того, в якій чверті тригонометричного кола лежить вісь по напрямку руху води; при переміщенні води вертикально вгору $\sin \alpha = +1$, при переміщенні вниз $\sin \alpha = -1$).

Рух води в ґрунті описується системою таких рівнянь, кожне з яких відповідає своєму напрямку потоку рідини в системі сполучених капілярів (рис. 2 в, г). Вплив цих потоків один на одного виражається рівнянням нерозривності водного потоку:

$$\bar{\omega}_{K(n)} v_n = \sum_{i=0}^{i=n-1} \frac{\bar{\omega}_{K(i)}}{4} (\xi_i^I v_i^I + \dots + \xi_i^{IV} v_i^{IV}), \quad (13)$$

де v_n – швидкість переміщення води в даній групі капілярів в n -м шарі ґрунту, м/с;

v_i^I, v_i^{IV} – швидкості переміщення води відповідно в I і IV групах капілярів i -го шару ґрунту, м/с;

ξ_i^I, ξ_i^{IV} – коефіцієнти відповідно для I і IV груп капілярів i -го шару ґрунту, що характеризують міру їх заповнення водою, безрозмірні величини (при просочуванні води на всю товщину i -го шару ґрунту $\xi_i = 1$; в інших випадках $\xi_i = 0$).

Враховуючи попередні дослідження отримаємо рівняння рівноваги сил, що діють на воду в системі сполучених капілярів. Для I групи капілярів:

$$\begin{aligned} g_{K(n)}^I \bar{\omega}_{K(n)} + \rho g \bar{\omega}_{K(n)} h_B - \rho_B g \bar{\omega}_{K(n)} \sum_{i=0}^{i=n} \Delta S_i \sin \alpha_i - \\ - \rho_B g \frac{\bar{\omega}_{K(n)}}{K_{w(n)}^I} \cdot \Delta S_n v_n^I - \sum_{i=0}^{i=n-1} \frac{4 \bar{\omega}_{K(n)} \Delta S}{(\xi_i^I K_{w(i)}^I + \dots + \xi_i^{IV} K_{w(i)}^{IV})} v_n^I = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Аналогічний вигляд мають рівняння для останніх груп капілярної системи. Вирішуючи ці рівняння, отримаємо для кожної групи капілярів швидкість переміщення води в ґрунті:

$$v_n = K_{w(n)} \left[q_{K(n)} / (\rho_B g) + h_B - P - (S - r) \sin \alpha_n \right] / (U + S); \quad (15)$$

$$P = \sum_{i=0}^{i=n-1} \Delta S_i \sin \alpha_i; \quad (16)$$

$$r = \sum_{i=0}^{i=n-1} \Delta S_i; \quad (17)$$

$$U = \sum_{i=0}^{i=n-1} \Delta S_i \left(\frac{4 K_{w(n)}}{\xi_i^I K_{w(i)}^I + \dots + \xi_i^{IV} K_{w(i)}^{IV}} \right) - \sum_{i=0}^{i=n-1} \Delta S_i. \quad (18)$$

Аналіз формул (11) та (15) показує, що в однорідному ґрунті швидкість руху води по ізольованому капіляру вища, ніж по капіляру, що входить в систему сполучених капілярів. Під однорідним розуміється ґрунт з постійними значеннями $K_w, W_{KB}, W_{OPT}, \rho_{СК}$ впродовж шляху, пройденого водою. Отже, епюра вологості однорідного ґрунту є в основному функцією припливу води по ізольованих капілярах. В цьому випадку розрахунок проводиться по формулі (15) окремо для кожної з чотирьох груп капілярів при $U = 0$. У шаруватих ґрунтах необхідно враховувати переміщення води за системою капілярів, що повідомляються, вводячи в розрахунок $U \neq 0$ по формулі (18).

Використовуючи правило Лопітала отримаємо формулу для визначення тривалості руху капілярної води по горизонтальному напрямку:

$$t_n = \frac{S^2 - r^2 + 2U(S - r)}{2K_{w(n)} [q_{K(n)} / (\rho_B g) + h_B - P]} \quad (19)$$

Джерелами живлення власно-капілярної води є поверхневі ґрунтові води, а також верховодка. При усуненні цих джерел власно-капілярна перетворюється на капілярно-підвішану воду, яка обмежена повітрям по поверхні розділу води, кривизна є мінімальною в найбільш крупних капілярах. В результаті виникають сили, за рахунок яких капіляри менших розмірів висмоктують воду з більших. Ці сили дорівнюють різниці значень питомих рушійних сил менісків даної групи капілярів і групи з мінімальним значенням. Враховуються ті капіляри, які заповнені водою. При чотирьох заповнених водою групах капілярів:

$$\bar{q}_K^I = q_K^I - q_{\min}, \bar{q}_K^{II} = q_K^{II} - q_{\min}, \bar{q}_K^{III} = q_K^{III} - q_{\min}, q_{\min} = q_K^{IV} \quad (20)$$

При трьох групах $q_{\min} = q_K^{III}$ і так далі.

4. Методика розрахунку оптимальної капілярної системи ґрунту

Процес ненасиченого руху води в ґрунтах визначається сукупною дією багато чисельних факторів. При таких умовах в основу визначення значень $q_K^I, q_K^{II}, q_K^{III}, q_K^{IV}, K_w^I, K_w^{II}, K_w^{III}, K_w^{IV}, \bar{\omega}_K$ покладені комплексні показники умов руху води в ґрунті, що встановлюються експериментально для кожного різновиду і щільності ґрунту при оптимальній вологості: крива зміни інтенсивності поглинання води в часі і епюра вологості від власно-капілярної води при русі вертикально вниз, а також коефіцієнт фільтрації води в ґрунт.

Для встановлення залежності між цими експериментальними даними і шуканими величинами, що визначають капілярну систему ґрунту, розглянемо фільтрацію води в ґрунті. Вона характеризується тим, що всі капілярні пори ґрунту заповнені водою, а рушійні сили менісків дорівнюють нулю та вода в ґрунті переміщається під дією сили тяжіння.

Відповідно до закону Дарсі залежність сили буде мати вигляд:

$$Q_p = K_\phi \bar{\omega}_{ГР} \left(\frac{\omega}{4\bar{\omega}_K} \right). \quad (21)$$

Коефіцієнт просочування води з урахуванням всіх складових:

$$K_w = \frac{K_\phi [N^\psi - (N-1)^\psi] \rho_B}{4^{\psi-1} (W_{KB} - W_{ОПТ}) \rho_{СК}}. \quad (22)$$

де K_ϕ – коефіцієнт фільтрації води в ґрунт, м/с;

N – порядковий номер групи капілярів;

ψ – параметр, що характеризує капілярну систему ґрунту, безрозмірна величина.

При $K_w^I = K_w^{II} = K_w^{III} = K_w^{IV}$ $\psi = 1$, при $K_w^I < K_w^{II} < K_w^{III} < K_w^{IV}$ $\psi > 1$.

Параметр Ψ визначається підбором. Для цього задаються значенням Ψ , при якому встановлюють $K_w^I, K_w^{II}, K_w^{III}, K_w^{IV}$. За епюрою вологості визначають глибину, на яку просочилася вода в окремих групах капілярної системи до моменту закінчення дослідів. Для цього епюру вологості на відріжку від W_{KB} та $W_{ОПТ}$ розбивають на чотири рівні частини. Середня глибина кожної з них і буде шуканою. Найбільша глибина, на яку просочилася вода, відповідає IV групі, найменша I групі капілярів. Після цього при відомих значеннях K_w^I і S^I , K_w^{II} і S^{II} , K_w^{III} і S^{III} , K_w^{IV} і S^{IV} , h_B , t , час проведення дослідів встановлюють по формулі (19) або по номограмі $q_K^I, q_K^{II}, q_K^{III}, q_K^{IV}$. При $\Psi = 1$ шукані величини повинні задовольняти певним вимогам, а саме $q_K^I = q_K^{II} = q_K^{III} = q_K^{IV}$. При $\Psi > 1$, повинні дотримуватися співвідношення: $q_K^I > q_K^{II} > q_K^{III} > q_K^{IV}$. Якщо незадоволені ці умови, необхідно прийняти більше значення Ψ і повторити розрахунки. Визначивши в такий спосіб рушійні сили менісків та коефіцієнт просочування, обчислюють інтенсивність поглинання води в ґрунт на різні моменти часу:

$$i_{\text{ВП}} = (v^I + v^{II} + v^{III} + v^{IV}) \bar{\omega}_K / \bar{\omega}_{\text{ГР}} . \quad (23)$$

де $i_{\text{ВП}}$ – інтенсивність поглинання води в ґрунт в даний період часу, м/с; $v^I, v^{II}, v^{III}, v^{IV}$ – швидкості переміщення води в той же момент відповідно в I, II, III і IV групах капілярів, м/с.

Такі розрахунки проводять при ряду значень Ψ . За шукані значення $q_K^I, q_K^{II}, q_K^{III}, q_K^{IV}, K_w^I, K_w^{II}, K_w^{III}, K_w^{IV}, m, \bar{\omega}_K$ приймають ті, при яких щонайкраще збігається розрахункова і фактична криві інтенсивності поглинання води в ґрунт.

Зразки ґрунту для визначення їх вологості відбирають після закінчення процесу поглинання в стислі терміни для того, не сталося істотногоперерозподілу води в ґрунтовій колонці. У піску важко зафіксувати згадану епюру вологості на момент закінчення процесу поглинання. Тому для такого ґрунту потрібно визначити епюру вологостіпрорусі власно-капілярної води вертикально вгору. У цьому випадку ґрунт в колонці насичують водою знизу. Відбір ґрунту на вологістьпроводять після того, як припиниться переміщення капілярної води. У цей момент інтенсивність поглинання дорівнює нулю По епюрі вологості ґрунту визначають значення:

$$q_K^I = \rho_B g h_K^I ; q_K^{II} = \rho_B g h_K^{II} ; q_K^{III} = \rho_B g h_K^{III} ; q_K^{IV} = \rho_B g h_K^{IV} . \quad (24)$$

де $h_K^I, h_K^{II}, h_K^{III}, h_K^{IV}$ – відповідно максимальна висота капілярного піднімання води в I, II, III і IV групах капілярів, м.

Аналогічно викладеному вище обчислюють за формулою (22) значення $K_w^I, K_w^{II}, K_w^{III}, K_w^{IV}$. Потім проводять розрахунок по формулі (23) і порівнюють отримані величини з фактичними значеннями інтенсивності поглинання води в ґрунт при його зволоженні зверху.

5. Аналіз зміни вологості ґрунтів від поверхневих і ґрунтових вод

Проектування земляного полотна проводять з врахуванням зволоження ґрунтів [7]:

- атмосферними осіданнями, випадними на поверхню дороги;
- поверхневими водами, що застоюються в осінній і весняний періоди на ділянках з незабезпеченим поверхневим стоком;
- поверхневими водами при цілорічному їх стоянні в підшви насипу;
- верховодкою і ґрунтовими водами.

У загальному випадку епюри вологості ґрунтів від опадів встановлюють для трьох розрахункових періодів [8].

Перший з них починається восени з моменту встановлення співвідношення і закінчується взимку при стійкому переході середньодобової температури повітря через $-2,5$ і -5°C при тривалості періоду від кінця осені до настання вказаних температур повітря відповідно не менше 20 та 10 діб. У цей період зими осідання випадають у вигляді дощу і мокрого снігу. У самій верхній частині ґрунтової товщі з'являються від'ємні температури, які були додатними. Нічні заморожування викликають так зване «вимерзання», тобто зменшення вологи в ґрунтах. Проте і в цей період, як показують спостереження, може відбуватися поглинання атмосферних опадів в ґрунти, яке закінчується з початком стійкого промерзання.

Епюру вологості ґрунтів прогнозують для розрахункового року, який встановлюють за тривалістю опадів, випадних в останній осінній місяць, протягом якого відбувається основне волого накопичення в ґрунтах. Як розрахунковий розглядають рік, що характеризується найбільшою сумарною тривалістю опадів повторюваністю 1 раз за термін служби покриття між капітальними ремонтами. Тривалість терміну можна прийняти рівною 20 рокам.

Другий період зволоження має місце при відтаванні ґрунтів під проїжджою частиною і узбіччями під час відлиги взимку. Кількість опадів в цей час впливають на вологість пісків верхньої частини земляного полотна і морозозахисного шару. Атмосферні осідання практично не впливають на вологість глинистих ґрунтів в шарах земляного полотна, в яких відбувалося морозне пучення до настання відлиги. У таких шарах ґрунти при відтаванні дають осідання, під час якого їх пори повністю заповнюються водою з частковим її віджиманням в морозозахисний шар. Водонасичення спостерігається у всій товщі земляного полотна до мерзлого шару [5].

За таких умов атмосферні осідання акумулюються в морозозахисному шарі і не поступають в ґрунт, що пролягає нижче. По тих же причинах осідання практично не впливають на вологість глинястих ґрунтів і в конструкціях без морозозахисного шару з піску.

У конструкціях з теплоізоляційними шарами, які перешкоджають промерзання земляного полотна, враховують атмосферні опади, що

випали в період відлиги при встановленні епюри вологості глинистих ґрунтів [9].

Прогноз припливу опадів в ґрунт проводять для трьох розрахункових років, що включають найбільш теплий і найбільш холодні роки з періодичністю повторення 1 раз в 20 років і рік зсередніми багаторічними температурами.

Третій період зволоження ґрунтів атмосферними осіданнями починається навесні з моменту відтавання активного шару земляного полотна і закінчується при встановленні співвідношення $h_{ВП} < h_{ИСП}$ ($h_{ВП}$, $h_{ИСП}$) – відповідно кількість води, що вбирається в ґрунт при випаданні одного дощу і що випаровується з ґрунтів земляного полотна між дощами. У цей період, так само як і в другій, атмосферні осідання акумулюються в морозозахисному шарі і не поступають в ґрунт, що пролягає нижче. Якщо відсутнє промерзання земляного полотна, осідання враховують при встановленні епюри вологості глинистих ґрунтів за тією ж схемою, що і для першого періоду зволоження. Розрахунковий рік встановлюють за тривалістю опадів, випадних в перший весняний місяць та у наступному за ним місяці $h_{ВП} > h_{ИСП}$.

Встановлюючи характерні ділянки дороги для розрахунку притоку води в земляне полотно, необхідно враховувати розділ території II і III дорожньо-кліматичних зон Європи на райони за умовами зволоження осіданнями. У основу районування були покладені середні значення дефіциту вологості повітря і опадів, що випадали в перший весняний і в останній осінній місяці. За цією ознакою територія II і III дорожньо-кліматичних зон підрозділена на п'ять районів. При розрахунку використовуються метеорологічні дані, приведені в дорожньо-будівельних посібниках для вказаних районів за умовами зволоження осіданнями [5].

6. Розрахунок оптимальної конструкції насипу на прикладі

Для прикладу взятий шляхопровід, який розташований на магістральній автомобільній дорозі Кіпти – Глухів – Бачівськ. Ділянка знаходиться в межах Кролевецько-Глухівського плато сильно розчленованого долинами річок, балок та ярів.

В геологічній будові ділянки шляхопроводу на розвідану глибину 19,2 м приймають алювіальні відклади, які представлені:

Vitalii Tsybulskyi

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Встановлення показників капілярних властивостей ґрунту .								
2	при вихідних даних:								
3	а) тип ґрунту:				Супісок пластичний				
4	б) щільність скелету ґрунту:				1530 кг/м ³				
5	в) капілярна вологоємність:				0,147				
6	г) оптимальна вологість:				0,105				
7	д) коефіцієнт фільтрації:				1,67 · 10 ⁻⁷ м/с				
8									
9	Умови випробування ґрунту:								
10	напор:				0,03 м				
11	температура води:				22 градусів				
12	тривалість досліду:				8 · 10 ⁴ с				
13									
14	Визначення глибини, на яку просочилася вода за вбудованими епіорами вологості:								
15	вода по ґрупах капілярів до моменту закінчення досліду.								
16									
17					$S' = 0,16$ м				
18									
19					$S'' = 0,21$ м				
20									
21					$S''' = 0,225$ м				
22									
23					$S^{IV} = 0,23$ м				
24									
25	Визначення коефіцієнтів просочування води по ґрупах капілярів:								
26	Тоді:	$\Psi = 1,4$			$K_{\omega}^I = 14,926 \cdot 10^{-7}$ м/с				
27									
28					$K_{\omega}^{II} = 24,464 \cdot 10^{-7}$ м/с				
29									
30					$K_{\omega}^{III} = 30,099 \cdot 10^{-7}$ м/с				
31									
32					$K_{\omega}^{IV} = 34,463 \cdot 10^{-7}$ м/с				
33									
34	При отриманих K_{ω} і S визначаємо питомі рушійні сили менісків.								
35									
36	При:	$K_{\omega}^I \cdot t = 0,0119$ м		$S' = 0,16$ м		$\frac{q_K^I}{\rho_B \cdot g} + h_B =$		1,07 м	
37									
38	$K_{\omega}^{II} \cdot t = 0,020$ м		$S'' = 0,21$ м		$\frac{q_K^{II}}{\rho_B \cdot g} + h_B =$		0,84 м		
39									
40	$K_{\omega}^{III} \cdot t = 0,024$ м		$S''' = 0,225$ м		$\frac{q_K^{III}}{\rho_B \cdot g} + h_B =$		0,77 м		
41									
42	$K_{\omega}^{IV} \cdot t = 0,028$ м		$S^{IV} = 0,23$ м		$\frac{q_K^{IV}}{\rho_B \cdot g} + h_B =$		0,69 м		
43									
44									
45	$q_K^I = 10192$ Па		$q_K^{III} = 7252$ Па						
46									
47	$q_K^{II} = 7938$ Па		$q_K^{IV} = 6468$ Па						
48									
49									
50									
51									
52	По результатам розрахунків видно, що відношення $q_K^I > q_K^{II} > q_K^{III} > q_K^{IV}$ виконується								
53	при заданому $\Psi = 1,4$ тому продовжуємо розрахунок								
54									
55	Визначення швидкості переміщення води по ґрупах капілярів в момент закінчення досліду:								
56									
57	Тоді:				$v' = 114,746 \cdot 10^{-7}$ м/с				
58									
59					$v'' = 122,322 \cdot 10^{-7}$ м/с				
60									
61					$v''' = 133,105 \cdot 10^{-7}$ м/с				
62									
63					$v^{IV} = 137,851 \cdot 10^{-7}$ м/с				
64									
65	Далі визначаємо інтенсивність вбирання води в ґрунт в момент закінчення досліду:								

Рис. 3. Фрагмент програми для підбору капілярної системи ґрунту

Chapter «Engineering sciences»

▲	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Встановлення на різні моменти часу розподілу власно-капілярної води									
2	двошарових ґрунтах: верхній шар товщиною				1,2м					
3	нижній шар завтовшки				0,5 м	над горизонтом ґрунтових вод				
4	Показники верхнього шару: тип ґрунту супісок легкий									
5										
6	$K_{oc} =$	0,92		$K_{\alpha(10)}^I =$	10,98	$\cdot 10^{-8}$	m/c	$q'_{K(10)} =$	106,61	гПа
7	$\rho_{ск} =$	1530	кг/м ³	$K_{\alpha(10)}^{II} =$	17,99	$\cdot 10^{-8}$	m/c	$q''_{K(10)} =$	83,03	гПа
8	$W_{кв} =$	14,6	%	$K_{\alpha(10)}^{III} =$	22,13	$\cdot 10^{-8}$	m/c	$q'''_{K(10)} =$	75,86	гПа
9	$W_{ом} =$	10,5	%	$K_{\alpha(10)}^{IV} =$	25,34	$\cdot 10^{-8}$	m/c	$q^{IV}_{K(10)} =$	67,66	гПа
10										
11	Показники нижнього шару: тип ґрунту суглинок пилуватий									
12	$K_{oc} =$	0,96		$K_{\alpha(10)}^I =$	60	$\cdot 10^{-10}$	m/c	$q'_{K(10)} =$	340	гПа
13	$\rho_{ск} =$	1850	кг/м ³	$K_{\alpha(10)}^{II} =$	165	$\cdot 10^{-10}$	m/c	$q''_{K(10)} =$	210	гПа
14	$W_{кв} =$	15,1	%	$K_{\alpha(10)}^{III} =$	275	$\cdot 10^{-10}$	m/c	$q'''_{K(10)} =$	195	гПа
15	$W_{ом} =$	13,4	%	$K_{\alpha(10)}^{IV} =$	385	$\cdot 10^{-10}$	m/c	$q^{IV}_{K(10)} =$	185	гПа
16										
17	середня температура ґрунту восени									
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30	Питома рушійна сила меніска: верхній шар									
31	$q^I_{K(2)} =$	105,5439	гПа	$K_{\alpha(2)}^I =$	9,333	$\cdot 10^{-8}$	m/c			
32	$q^{II}_{K(2)} =$	82,1997	гПа	$K_{\alpha(2)}^{II} =$	15,2915	$\cdot 10^{-8}$	m/c			
33	$q^{III}_{K(2)} =$	75,1014	гПа	$K_{\alpha(2)}^{III} =$	18,8105	$\cdot 10^{-8}$	m/c			
34	$q^{IV}_{K(2)} =$	66,98	гПа	$K_{\alpha(2)}^{IV} =$	21,54	$\cdot 10^{-8}$	m/c			
35										
36										
37										
38										
39	Нижній шар									
40	$q^I_{K(1)} =$	336,6	гПа	$K_{\alpha(1)}^I =$	51	$\cdot 10^{-10}$	m/c			
41	$q^{II}_{K(1)} =$	207,9	гПа	$K_{\alpha(1)}^{II} =$	140,25	$\cdot 10^{-10}$	m/c			
42	$q^{III}_{K(1)} =$	193,05	гПа	$K_{\alpha(1)}^{III} =$	233,75	$\cdot 10^{-10}$	m/c			
43	$q^{IV}_{K(1)} =$	183,15	гПа	$K_{\alpha(1)}^{IV} =$	327,25	$\cdot 10^{-10}$	m/c			
44										
45										
46										
47										
48										
49	Визначення розподілу власно-капілярної води над горизонтом ґрунтових вод через 30 діб									
50	з сометну її переміщення у важкому пилуватому суглинку для 1 групи капілярів: 30									
51										
52	IV група:	$K_{\alpha(2)}^I =$	0,0132	m	III група:	0,0364	III група:	0,0606	IV група:	0,085

Рис. 4. Фрагмент програми для визначення розподілу власно-капілярної води

- супіском твердим та пластичним, потужністю до 6,6 м;
- суглинком пилуватим текуче пластичним, з глибини 10,4 м з про- шарками (5-10 см) піску мілкого насиченого водою, щільного, до 10%, потужністю 5,5 м;

Таблиця 2.2

Грунт	Висота над горизонтом ґрунтових вод, м	Початкова вологість ґрунту, %	Вологість ґрунту, %, після перем. капілярної води за час, дів		
			30	38	60
			суглинок	0,28	13,4
	0,28	13,4	15,1	15,1	15,1
	0,31	13,4	14,85	15,1	15,1
	0,37	13,4	14,675	14,82	15,1
	0,4	13,4	14,47	14,675	15,1
	0,45	13,4	14,25	14,46	14,89
	0,5	13,4	13,825	14,25	14,675
	0,5021	10,5	10,5	14,05	14,6
	0,503	10,5	10,5	13,575	14,6
	0,5039	10,5	10,5	12,55	14,6
супісок	0,5068	10,5	10,5	11,525	14,6
	0,5129	10,5	10,5	10,5	14,6
	0,519	10,5	10,5	10,5	13,575
	0,524	10,5	10,5	10,5	12,55
	0,541	10,5	10,5	10,5	11,525

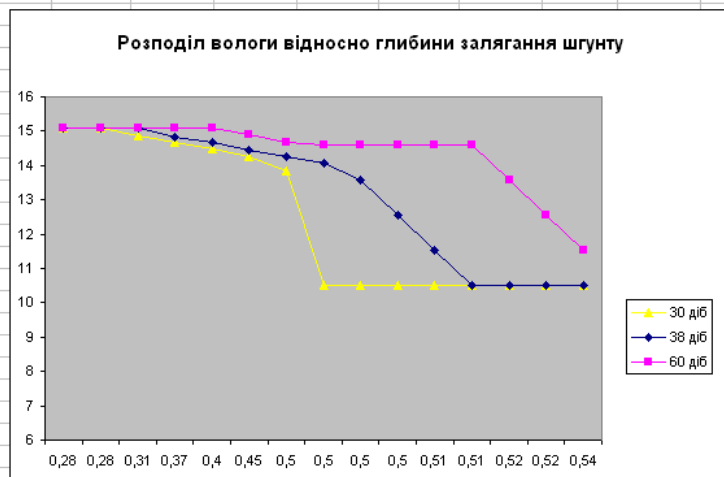


Рис. 5. Фрагмент програми для визначення розподілу власно-капілярної води

– суглинком пилюватим туго пластичним з включенням гравію корінних порід до 2-3%, з прошарками (10-20 см) піску мілкого до 3-5%, з глибини 15,7 м без прошарків, розкритою потужністю 6,7 м.

Грунтові води зустрінуті у свердловинах на глибині 1,7 м. Згідно за даними хімічного аналізу вода не агресивна по відношенню до бетону нормальної щільності.

Приклад розрахунку в програмі Microsoft Excel водно-теплогового режиму насипу представлений на прикладі підходів до шляхопроводу Хутір Михайлівський – Ворожба (рис. 3-5).

7. Висновки

1. Вдосконалено методику визначення оптимальної капілярної системи в шаруватих ґрунтах земляного полотна.

2. За допомогою розробленої програми по визначенню характеристик капілярної системи ґрунту, було підраховано та підібрано капілярну систему для конструкції підходів насипу до шляхопроводу.

3. Визначена швидкість та інтенсивність поглинання води в ґрунт по групам капілярів в різні періоди часу дали змогу встановити, що ці параметри зменшуються з часом.

4. На основі підібраної оптимальної капілярної системи встановлено несталий розподіл власно-капілярної води в конструкції насипу.

5. Аналіз вологості ґрунту при піднятті капілярної води показав, що при розташуванні шару ґрунту с великим коефіцієнтом просочування над шаром з меншим коефіцієнтом різко падає швидкість переміщення власно-капілярної води у верхні шари ґрунту.

Список літератури:

1. ДБН В.2.3-4-2007 Державні будівельні норми. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Київ : Держбуд України, 2007. 115 с.
2. ВБН В.2.3-218-186-2004. Дорожній одяг нежорсткого типу. Київ : Укравтодор, 2004. 175 с.
3. Кизима С.С. Основи експлуатації автомобільних доріг. Київ, 2002.
4. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / Под ред. И.А. Золотаря, Н.А. Пузакова. Москва : Транспорт, 1971. 410 с.
5. Водно-тепловой режим земляного полотна / под ред. В.И. Рувинский. Москва : Транспорт, 1982. 166 с.
6. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Под ред. Хархута Н.Я., Васильева Ю.М. 1972. 286 с.

7. Краткий справочник по трубам и малым мостам / О.В. Андреев, К.В. Гайдук, А.И. Подан и др. Москва : Транспорт, 1972. 176 с.
8. Операционный контроль качества земляного полотна и дорожных одежд / Под ред. А.Я. Тулаева. Москва : Транспорт, 1985. 224 с.
9. Типовые решения по восстановлению способности земляного полотна к обеспечению прочности дорожной одежды на пучинистых участках автомобильных дорог. Москва : РДА, 2000. 101 с.

References:

1. DBN V.2.3-4-2007. Derzhavni budivel'jni normy. Sporudy transportu. Avtomobil'ni doroghy. (2007). Kyiv: Derzhbud Ukraïny, 115 p.
2. VBN V.2.3-218-186-2004. Dorozhnyj odjagh nezhorstkogho typu (2004). Kyiv: Ukravtodor, 175 s.
3. Kyzyma, S.S. (2002). Osnovy ekspluatatsiji avtomobil'nykh dorogh. Kyiv.
4. Zolotarja, Y.A., Puzakova, N.A. (1971). Vodno-teplovoj rezhym zemljanogho polotna y dorozhnykh odezhd. Moskva: Transport, 410 p.
5. Ruvyn'skyj, V.Y. (1982). Vodno-teplovoj rezhym zemljanogho polotna. Moskva: Transport, 166 p.
6. Kharkhuta, N.Ja., Vasyljeva, Ju.M. (1972). Prochnostj, ustojchivostj y unlotnenye gruntov zemljanogho polotna avtomobil'nykh dorogh. 286 p.
7. Andreev, O.V., Ghajduk, K.V. and others (1972). Kratkyj spravochnyk po trubam y malym mostam. Moskva: Transport, 176 p.
8. Tulaeva, A.Ja. (1985). Operacyonnyj kontrolj kachestva zemljanogho polotna y dorozhnykh odezhd. Moskva: Transport, 224 p.
9. Typovye reshenija po vosstanovleniju sposobnosti zemljanogho polotna k obespecheniju prochnosti dorozhnoj odezhdy na puchynistykh uchastkakh avtomobil'nykh dorogh (2000). Moskva: RDA, 101 p.