

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОНАКОПИЧЕННЯ В РОБОЧОМУ ШАРУ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЗА ТИПАМИ ЗВОЛОЖЕННЯ

DETERMINING MOISTURE ACCUMULATION METHODS IN THE WORKING LAYER OF THE ROAD BED BY TYPES OF MOISTURE



Рутковська Інеса Анатоліївна, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, професор кафедри аеропортів, e-mail: ria_ntu@ukr.net, тел. +380442807073,

<https://orcid.org/0000-0001-7832-4222>



Кватадзе Євгенія Іродіонівна, аспірантка, Національний транспортний університет, аспірантка кафедри транспортного будівництва та управління майном та кафедри аеропортів, e-mail: kvatadzeev@gmail.com, тел. +380442803942,

<https://orcid.org/0000-0003-2798-8955>

Анотація. *Вступ.* Стан дорожнього одягу і термін його служби пов'язані з особливостями водно-теплового режиму, тобто з щільністю та вологістю ґрунту земляного полотна, значення яких змінюються протягом річного циклу за глибиною. В районах з сезонним промерзанням в дорожньому одязі та земляному полотні одночасно відбувається декілька процесів: теплообмін зволоженого матеріалу з приземним повітрям; дифузія пари і води в порах матеріалу; вологообмін між дорожнім покриттям і приземним повітрям; інфільтрація опадів через тріщини в одязі і полотні; інфільтрація води в полотно з боку узбіччя; надходження капілярної води. Водний режим верхніх шарів земляного полотна також погіршується внаслідок ускладнення просушування ґрунту під водопроникним покриттям, що призводить до зниження його міцності при відтаванні.

Проблематика. Задача забезпечення несної здатності земляного полотна та, як наслідок, рівності покриття потребує якісного рішення шляхом визначення об'ємів сезонного вологонакопичення у робочому шарі земляного полотна, з метою подальшої розробки ефективних конструктивних заходів щодо регулювання водно-теплового режиму за рахунок відведення води за межі дорожньої конструкції.

Мета роботи: проведення аналізу та визначення напрямків удосконалення методів розрахунку об'ємів сезонного вологонакопичення з урахуванням процесів тепло- та вологообміну в дорожній конструкції.

Матеріали і методи: аналітичні методи; методи математичного моделювання; основні положення теорії пружності, термо- та гідродинаміки.

Результати: у роботі досліджено моделі міграції сезонного вологонакопичення в залежності від походження джерел зволоження, проведено аналіз існуючих методів з розрахунку поля вологості у робочій зоні земляного полотна та визначено наступні напрямки їх удосконалення.

Висновки. Запропоновані рішення враховують властивості ґрунту з вологопровідності, показник якої визначається за застарілими, ще за радянських часів, методами. Наступним напрямком роботи авторів є розробка удосконалених методів визначення сезонної вологості ґрунтів в тілі земляного полотна на основі коефіцієнта вологопровідності, адаптованих до європейських.

Ключові слова: земляне полотно, водно-тепловий режим, вологість ґрунту, вологонакопичення, джерела зволоження.

Вступ

Однією з актуальних проблем сьогодення у дорожній галузі лишається руйнування покриттів внаслідок недостатньої міцності шарів основи дорожнього одягу та робочої зони земляного полотна. Істотною причиною цього є перезволоження ґрунту земляного полотна, як правило через незадовільний стан або відсутність систем дренажування та поверхневого водовідведення.

На відміну від покриття, земляне полотно і шари основи дорожнього одягу повинні влаштовуватись міцними відразу на достатню перспективу, через потенційне зростання інтенсивності руху, особливо великовагових транспортних засобів. Тоді не буде виникати потреба перебудови усієї дороги, що пов'язано зі значними труднощами та витратами. Лише на досить міцній основі дорожнє покриття може протягом тривалого часу зберігати свою міцність і рівність.

Середня кількість опадів за осінній період 2022 року в Україні становила 188,5 мм, що перевищує середнє багаторічне значення на 71,5 мм та є найбільшим показником за останні 10 років [1]. В цей період відбувається зволоження полотна через узбіччя і укоси (рис. 1). В місцях примикання узбіч до проїзної частини може утворюватися застій води на більш або менш тривалий період. При незадовільному стані покриття, наявності тріщин і руйнувань, а також при водопроникних покриттях звожуються шари основи дорожнього одягу за рахунок інфільтрації опадів. В періоди частих зимових відлиг сніг тане і через тріщини в покритті також зволожує дорожню конструкцію.

Найбільш складні умови роботи земляного полотна виникають при його промерзанні та відтаванні. В ці періоди процеси зміни вологості ґрунту супроводжуються змінами фазового складу води з виділенням або поглинанням тепла. Також осіннє вологонакопичення визначає хід процесів промерзання ґрунту і міграції вологи до границі льодовиділення. З іншого боку, ступінь зменшення вологості ґрунту земляного полотна в літній період внаслідок випаровування вологи та зниження рівня ґрунтових вод залежить від його вологості у весняний період.

Весною танення снігу відбувається у період, коли ґрунт на укосах і узбіччях ще не відтанув. Зволоження полотна поверхневим стоком на ділянках доріг з незадовільним водовідведенням може бути значним. При інтенсивному русі великовагового автомобільного транспорту вільна вода відтискається з робочої зони земляного полотна доверху, сприяючи зниженню міцності вище розміщених конструктивних шарів дорожнього одягу. Відсутність ефективних поперечних випусків вільної води з дренажних шарів та постійне надмірне перенавантаження сприяє утворенню масових деформацій на дорожніх покриттях.

Для прогнозу зміни об'єму вологонакопичення в дренажному шарі у роботі [2] запропоновано аналітичне рішення на основі одновимірної моделі, що враховує капілярний ефект та водонасичення. Також наведено аналіз щодо дренажної здатності матеріалів, за властивістю водоутримання та розмірами фракцій, і вимог за міцністю, що обумовлює ефективність роботи дренажів мілкового закладання.

Вплив частих промерзань та відлиг на стан ґрунту земляного полотна на основі експериментальних досліджень було проаналізовано у роботі [3]. Експериментальні результати підтвердили збільшення інтенсивності амплітуди напружень і накопичувальних деформацій зі збільшенням числа циклів замерзання – відтавання та кількості циклів навантаження.

Для визначення у робочому шарі земляного полотна об'єму вологонакопичення, що впливає на міцність та морозостійкість дорожнього одягу, потрібно встановити тип його зволоження. У роботах [4 – 6] для аналізу процесу накопичення вологи використовується принцип диференційного дослідження, згідно з яким водно-тепловий режим дорожньої конструкції класифікується за чотирма розрахунковими типами – дифузний, плівковий, капілярний та інфільтраційний. В основу такого поділу покладені наступні ознаки: 1) джерела зволоження; 2) ступінь водопроникності дорожнього одягу, що характеризується відсутністю або наявністю в покритті тріщин, а в одязі водопроникних шарів; 3) характер розподілу вологості за глибиною дорожньої конструкції в несприятливі за зволоженням періоди року (весна, осінь); 4) вологопровідність ґрунту, інтервал сезонного коливання вологості, і, відповідно, деформованості ґрунту полотна.

Складність вказаних процесів обумовлює **мету роботи** щодо аналізу та визначення напрямків удосконалення методів розрахунку об'ємів сезонного вологонакопичення в дорожній конструкції. Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних **задач**: дослідження моделі міграції сезонного вологонакопичення в залежності від походження джерел зволоження, проведення аналізу існуючих методів з розрахунку поля вологості у робочій зоні земляного полотна та визначення напрямків їх удосконалення.

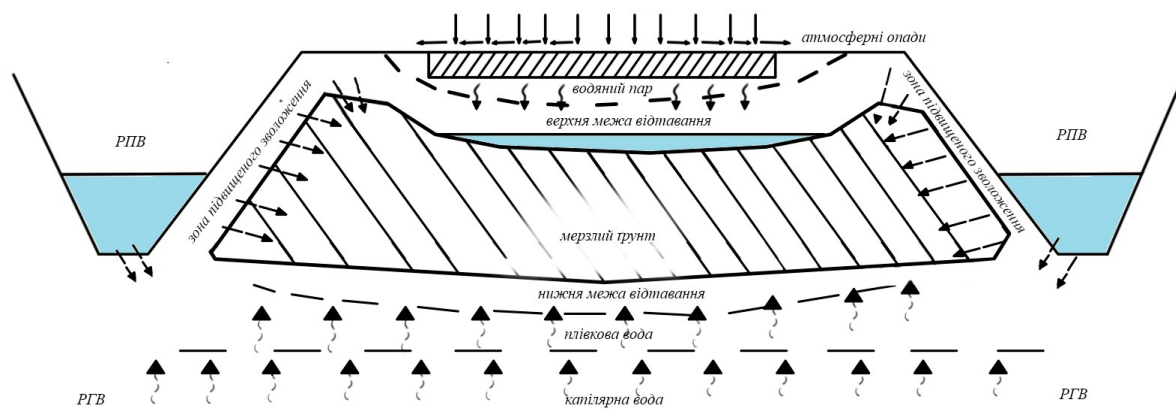
Виклад основного матеріалу дослідження.

Експериментально встановлено, що фазовий склад води у земляному полотні залежить від загальної вологості ґрунту [5, 6]. Оскільки вологість ґрунту полотна протягом року змінюється, то відбувається і систематична зміна співвідношення фаз водяної пари та плівкової вологи (рис. 1) у широкому інтервалі вологості від максимальної гігроскопічності до повної вологоємності. Отже, для

всіх трьох гідрологічних груп необхідно досліджувати моделі міграції та вологонакопичення не однофазної, а двофазної вологи. За такої постановки механізм міграції вологи суттєво ускладнений.

Вологообмін у ґрунтах, що сезонно промерзають, відбувається в наступному інтервалі вологості $W_{MG} < W < W_{PB}$, де W_{MG} – максимальна гігроскопічна вологостемність, W_{PB} – повна вологостемність. У такому інтервалі стан ґрунту відповідає гетерогенній системі, яка неводонасичена рідкою фазою вологи. Зі збільшенням вологості та обводненості мінеральних частинок такого ґрунту механізми міграції вологи є змішаними [4 - 6]: в інтервалі вологості $0,25 W_{PB} < W < 0,5 W_{PB}$ – дифузно-конденсаційний + плівковий; в інтервалі $0,5 W_{ne} < W < 0,7 W_{ne}$ – дифузно-конденсаційний + плівковий, капілярний; в інтервалі $0,7 W_{ne} < W < W_{ne}$ – дифузно-конденсаційний + капілярний.

Незалежно від походження і потужності джерел зволоження протягом всього холодного періоду року відбувається рух пари і води у верхню частину полотна з більш глибоких шарів. Причина цього - різниця тисків в плівках ґрунтової води в теплій і холодній зонах полотна. Внаслідок накопичення води в зоні промерзання вологість у верхній частині полотна зростає, досягаючи максимального значення до кінця холодного періоду. Тому в період відтавання ґрунтова основа має найбільшу сезонну вологість і найменшу міцність, яка приймається для розрахунку товщини одягу (рис. 1). В теплий період року відбувається зворотній процес – висихання ґрунту полотна, зменшення вологості та підвищення міцності.



— — межа відтавання на початку холодного періоду; — — межа відтавання наприкінці холодного періоду; —→ рух вологи на початку холодного періоду; —→ рух вологи наприкінці холодного періоду.

Рисунок 1 – Модель міграції вологонакопичення двофазної вологи в дорожній конструкції під впливом джерел зволоження.

Figure 1 – The migration model of the moisture accumulation of two-phased moisture in road structure under the influence of sources of moisture

Таким чином, при глибокому заляганні ґрунтових вод зволоження дорожньої конструкції можливе атмосферними опадами, поверхневим стоком і водяною парою. При водонепроникних для опадів покриттях основними джерелами зволоження є водяна пара і вода, яка конденсується з неї. Однак визначення розрахункової вологості вимагає аналізу змін вологості ґрунту і, відповідно, здійснення її прогнозування послідовно по сезонам.

Початкове накопичення вологи у ґрунтах земляного полотна після літнього просихання починається з переходом середніх добових температур повітря через $+3 - +5^{\circ}\text{C}$ [5, 6]. До цього часу відбувається зміна напрямку теплового потоку в ґрунтах. При літньому просиханні ґрунтів тепловий потік спрямований зверху вниз (рис. 1). Основним джерелом зволоження в період початкового осіннього накопичення є атмосферні опади і водяна пара.

Спостереження на дорогах показують, що притока вологи зверху за період початкового накопичення визначається не лише сумою опадів, але й інтенсивністю, тривалістю їх випадіння, температурою і дефіцитом вологості повітря.

Восени, як правило, збільшується тривалість випадіння опадів, зменшується інтенсивність та дефіцит вологості повітря і випаровування, розпочинається підняття ґрунтових вод. При зволоженні земляного полотна від рівня ґрунтових вод, вище зазначена, умова щодо визначення початку періоду осіннього вологонакопичення є також справедливою. Підвищення рівня ґрунтових вод (РГВ), а відповідно, і збільшення кількості вологи, яка підтягується вгору від РГВ, може наставати тільки при підвищенні інфільтрації дощових опадів в ґрунт. Кінець періоду осіннього вологонакопичення в ґрунтових основах може визначатися за датами початку промерзання ґрунту. Знаючи тривалість періоду осіннього вологонакопичення, можна знайти середню осінню вологість ґрунту, а потім спрогнозувати зиму і весняну.

Зимове накопичення вологи в ґрунтах відбувається шляхом її переміщення за напрямком теплового потоку знизу і з боків, від більш теплих місць до більш холодних, за рахунок перерозподілу її внутрішніх запасів та міграції від рівня підземних вод (рис. 1).

При неглибокому заляганні підземних вод від поверхні землі інтенсивність зимового вологонакопичення особливо зростає, коли фронт промерзання досягає капілярної кайми. Чим глибше промерзання входить в капілярну кайму, особливо в її нижню зону, де більша частина вологи перебуває у вільному стані, тим більше зимове вологонакопичення.

На інтенсивність зимового вологонакопичення, окрім швидкості промерзання ґрунту, впливає також швидкість міграції води, яка залежить від виду ґрунту, ступені його ущільнення і умов підтоку вологи, в тому числі, від наявності ґрунтової води. Найбільш небезпечні пілуваті ґрунти, у яких велика поверхнева енергія поєднується з малим опором підйому води у порах, внаслідок чого швидкість підтоку води в можливу зону здимання велика і відбувається інтенсивне утворення льодяних лінз у ґрунті.

На основі теорії тепломасообміну, представленій у роботах [4, 5], визначається зміна вологості ґрунту полотна по глибині для певного типу місцевості за характером зволоження. Величина загального вологонакопичення ΔW у верхній частині полотна глибиною h_j за холодний період значною мірою залежить від гідрологічних умов. За відсутності перепаду вологості перед промерзанням $W_0 - W_i$ (дифузний водно-тепловий режим) характерне лише незначне зволоження у верхній частині (0 – 5 см) полотна. За наявності деякого перепаду $W_0 - W_i$ (дифузно-плівковий водно-тепловий режим) відзначається помітне зростання вологості у верхній частині (0 – 25 см) полотна. За наявності значного перепаду $W_0 - W_i$ (капілярний водно-тепловий режим) у верхній частині полотна відбувається інтенсивне вологонакопичення.

Так, для місцевості з сухими ділянками поле вологості (тобто зміна вологості за глибиною h_j (м), в різні моменти холодного періоду) можна розрахувати за рівнянням

$$W(h_j, T_p) = W_n - mh_j \sqrt{\frac{T_p}{\pi k_1}} \exp\left(-\frac{h_j^2}{4k_1 T_p}\right) + m \left(T_p + \frac{h_j^2}{2k_1}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h_j}{2\sqrt{k_1 T_p}}\right), \quad (1)$$

де W_n – відносна вологість ґрунту по глибині земляного полотна на початку холодного періоду, $W(h_j, 0) = \text{const}$, T_p – час в годинах, який відраховується від початку періоду з W_n , год.; m – коефіцієнт, що враховує зміну вологості ґрунту полотна під дорожнім одягом в період морозного вологонакопичення, 1/год.; k_1 – коефіцієнт вологопровідності двофазової вологи, м²/год.

Визначення тривалості розрахункового холодного періоду T_p має важливе значення як для розробки методу прогнозування сезонної вологості, так, відповідно, і міцності. Як правило, початок розрахункового періоду T_n відносять до дати середньодобової температури повітря 0°C. Але визначення цього показника залежить від багатьох факторів: району, конструкції одягу, його міцності, кольору покриття, фізико-теплових властивостей. У першому наближенні можна записати $T_n = f(R_0, t_{нов}, t_{нок})$, де R_0 сумарний тепловий опір одягу ($K \times \text{м}^2 / Bm$); $R_0 = \sum h_i / \lambda_i$; $t_{нов}, t_{нок}$ – товщина шарів (м) з коефіцієнтами теплопровідності λ_i ($Bm / K \times \text{м}$), температура повітря і покриття, °C.

У роботі [4] тривалість T_p запропоновано розраховувати як деяку швидкість відтавання земляного полотна на глибину $T_p = h_j / \alpha_{ман}$, де $\alpha_{ман}$ - середня швидкість відтавання земляного полотна з врахуванням шаруватості одягу:

$$T_p = \frac{1}{\alpha_{ман}} \sqrt{\frac{\alpha_{ман} T (t_e - t_l)}{\rho_z W \theta_l} + 0,25(R_n - R_0)^2 \lambda^2 - \frac{0,5}{\lambda} (R_n - R_0) \lambda}, \quad (2)$$

де λ, W, ρ_z - коефіцієнти теплопровідності, вологості і щільності мерзлого ґрунту; θ_l - прихована теплота льодоутворення, кДж/кг; t_l - температура льодоутворення; R_n - тепловий опір на межі повітря-покриття.

Для місцевості з сирими ділянками небезпека зволоження виникає внаслідок міграції води з бічних канав. Поле вологості у даному випадку можна розрахувати за формулою

$$W(h_j, T_{ce}) = W_{не} - [W_{не} - (W_{н1} + m_1 T_{ce})] \frac{h_j}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{n} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 k_1 T_{ce}}{l^2}\right) \left[W_{н1} - W_{не} - \frac{(-1)^n l^2 m}{\pi^2 n^2 k_1} \right] + \frac{(-1)^n l^2 m}{\pi^2 n^2 k_1} \right\} \sin \frac{n\pi h_j}{l}, \quad (3)$$

де l - горизонтальна відстань від точки перетину тимчасового (застійного) горизонту поверхневих вод (ГПВ) з укосом полотна до кромки проїзної частини; $W_{не}$ - відносна вологість ґрунту полотна по вертикалі, проведеної через точку перетину ГПВ з укосом; $W_{н1}$ - початкова відносна вологість ґрунту в точці перетину ГПВ до наповнення бічної канави водою; T_{ce} - тривалість стояння води в бічній канаві, год; m, m_1 - коефіцієнти, що враховують інтенсивність наростання вологості ґрунту за період T_{ce} у вертикальних площинах відповідно біля канави і біля кромки проїзної частини.

Для місцевості з мокрими ділянками виникає серйозна небезпека міграції вологи з зони капілярного зволоження знизу. Рівняння для розрахунку поля вологості для цих умов має вигляд

$$W(h_j, T_{ce}) = W_1 + m T_{ce} + l / h_{ce} (W_{н1} - W_1 - m T_{ce}) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2m h_{ce}^2}{\pi^3 n^3 k_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 k_1 T_{ce}}{h_{ce}^2}\right) \sin \frac{n\pi h_j}{h_{ce}} \right], \quad (4)$$

де h_{ce} - відстань від розрахункового горизонту ґрунтових вод (РГГВ) до низу дорожнього одягу, м; T_{ce} - тривалість стояння РГГВ в год.; W_1 - відносна вологість ґрунту під граничним шаром одягу в період $T_{ce} = 0$; $W_{н1}$ - початкова відносна вологість ґрунту в площині дзеркала РГГВ.

Прогнозування осіннього та зимового вологонакопичення в земляному полотні виконується на основі розрахунку величини середньої осінньої W_{cp}^{oc} і весняної W_{cp}^{ves} вологостей, згідно [5], за відповідними формулами.

Для визначення середньої осінньої вологості W_{cp}^{oc} при $F_{oe} \leq 0,25$:

$$\frac{W_{cp}^{oc} - W_0}{W_{пв} - W_0} = \left(1 + \frac{H_g}{H_a}\right) \cdot \operatorname{erfc} \left[\left(1 + \frac{H_g}{H_a}\right) \cdot \frac{1}{2\sqrt{F_{oe}}} \right] + \left(1 - \frac{H_g}{H_a}\right) \operatorname{erfc} \left[\left(1 - \frac{H_g}{H_a}\right) \cdot \frac{1}{2\sqrt{F_{oe}}} \right] + \frac{2\sqrt{F_{oe}}}{\sqrt{\pi}} \times \frac{H_g}{H_a} \left\{ \exp \left[-\frac{1}{4F_{oe}} \left(1 - \frac{H_g}{H_a}\right)^2 \right] - \exp \left[-\frac{1}{4F_{oe}} \left(1 + \frac{H_g}{H_a}\right)^2 \right] \right\}; \quad (5)$$

при $F_{oe} > 0,25$

$$\frac{W_{cp}^{oc} - W_0}{W_{пв} - W_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{H_g}{H_a}\right) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{H_g}{H_a}\right) \cdot \exp \left(-\pi^2 \frac{F_{oe}}{4}\right), \quad (6)$$

де H_a - глибина активної зони дорожньої конструкції, м; W_0 - початкова (оптимальна) вологість; F_{oe} - критерій осіннього вологонакопичення:

$$F_{ov} = \frac{k_1 \tau_{en}}{H_g^2} \quad (7)$$

τ_{en} – тривалість періоду вологонакопичення, год; H_g – відстань від верху земляного полотна до рівня ґрунтових або поверхневих вод, м.

Існуючі методи щодо визначення розподілу вологості в робочій зоні земляного полотна, зокрема рівняння (1), (3-6) ґрунтуються на показнику вологопровідності ґрунту, що визначається експериментально за застарілими методиками, лабораторна база яких не відповідає новим європейським вимогам [7].

Величину H_g можна визначати за наявності багаторічних (не менше 20 років) спостережень або за даними разових вимірів рівня ґрунтових вод у будь-яку пору року. У цьому випадку слід використовувати типові графіки сезонних коливань рівня ґрунтових вод.

Період відтавання та максимального вологонасичення починається з визначенням у верхніх шарах ґрунту стійких позитивних температур і продовжується до повного відтавання ґрунту. Перед його початком підвищується температура мерзлих ґрунтів і змінюється напрямок теплового потоку. Цей період від початку відтавання до певної глибини h_j характеризується найнебезпечнішим станом дорожнього одягу за умовами зволоження.

Вода, яка звільняється при відтаванні льодяних лінз в мерзлих ґрунтах, насичує в результаті здимання розушільнений ґрунт, що призводить до різкого зниження його стійкості. До запасів вологи, що накопичились за зиму, у процесі відтавання додається волога від атмосферних опадів і снігу, що тане (рис. 1).

При неглибокому заляганні від поверхні землі ґрунтових вод і значному зимовому вологонасиченні підземні води можуть перешкоджати просочуванню вниз вологи, яка звільнилась у процесі відтавання мерзлих ґрунтів, і тим самим сприятимуть перезволоженню відталених ґрунтів. Дослідженнями [4 - 6] встановлено, що по мірі танення льоду в ґрунті частина звільненої вологи іде на гідратацію обезводнених при промерзанні частинок (до 15% від ваги скелету ґрунту), частина води залишається у відталому ґрунті в капілярах і замкнених пустотах, які утворюються на місці льодяних лінз. Решта вільної води по мірі відтавання опускається донизу, а частина під впливом сил напору піднімається до поверхні і надходить в дренальний шар.

Швидкість відтавання суттєво впливає на процес зміни вологості земляного полотна. Чим триваліша затяжна весна з нічними заморозками, які змінюються теплими сонячними днями без опадів, тим швидше знижується вологість ґрунту внаслідок підвищеного випаровування вдень і морозного вимерзання вночі, отже менша ймовірність зниження модуля пружності ґрунту. Якщо ж весна дощова, що характеризується високою швидкістю відтавання, збільшується кількість деформацій на покриттях через зниження міцності ґрунту і матеріалу підстиляючого шару.

В якості розрахункової, при призначенні конструкції дорожнього одягу, приймають найбільшу відносну весняну вологість:

$$W_{весн.відн} = \frac{W_{весн.}}{W_T} = W_{ос.відн} + \frac{Q_{нак} \cdot \rho_v}{\delta_z (h_{np} - h_j) W_T S} = W_{осін.відн} + \frac{W_{з.н}}{W_T}, \quad (8)$$

де $W_{весн.}$ – вологість ґрунту земляного полотна навесні; W_T – вологість на межі текучості; $W_{осін.відн}$ – відносна осіння вологість; $Q_{нак.}$ – об'єм накопиченої за зиму вологи в стовпчику ґрунту перетином $S = 1 \text{ см}^2$ [1, 7];

ρ_v – щільність води, г/см³; δ_z – об'ємна вага талого ґрунту, г/см²; h_{np} – глибина промерзання від поверхні покриття по осі проїзної частини, см; h_j – загальна товщина шарів дорожнього одягу, см;

$W_{з.н}$ – зимова накопичена вологість.

З наведеної формули видно, що зі зміною параметрів дорожньої конструкції змінюється розрахункова вологість ґрунту земляного полотна, а також його деформативні та міцнісні характеристики.

Окрім загальної товщини перезволоженого ґрунту у робочій зоні земляного полотна, має значення рівномірність відтавання в поперечному та поздовжньому напрямках до осі дороги. Навесні

через велику теплопровідність одягу земляне полотно відтає під проїзною частиною швидше, ніж на узбіччях і укосах, тому в середній частині полотна відбувається скупчення вільної води, яка не має виходу через мерзлі укоси. На ділянках доріг з поздовжніми похилами вода, що накопичилась в кориті земляного полотна, стікає і скупчується у знижених місцях, особливо поблизу увігнутих переломів профілю дороги. В результаті в окремих місцях суттєво знижується міцність ґрунту земляного полотна і виникають руйнування дорожнього одягу.

По мірі прогрівання земляного полотна починається період просихання ґрунтів, тобто зменшення їх вологості і відновлення щільності та несної здатності. Прискорення просихання може бути досягнуто влаштуванням дренажу мілкого закладання. Тому, чим ефективніше працюють дренажні пристрої, тим швидше відновлюється літній режим і підвищується модуль пружності ґрунту. В цей період основним джерелом зволоження є атмосферні опади. Висока інтенсивність випадання літніх опадів та великий дефіцит вологості повітря сприяють утворенню великих запасів вологи у верхній частині земляного полотна. Притік вологи знизу від підземних вод зменшується, а в деяких випадках і зовсім зупиняється, оскільки в цей період відбувається пониження рівня ґрунтових вод. Для цього періоду характерні мінімальна вологість і максимальна щільність ґрунтів земляного полотна [6].

Висновки. Основними умовами, які визначають вологонакопичення, вважають: зміну зимових температур в ґрунті та джерела зволоження. Визначення фізичного змісту водно-теплових процесів земляного полотна і дорожнього одягу дозволяє розкрити закономірності руху, а, відповідно, і раціонального регулювання накопичення вологи в дорожній конструкції.

Принцип проектування дорожніх конструкцій заснований на законах термо- та гідродинаміки. Відповідно, на додаток до розрахунку на міцність, необхідно враховувати температурні та вологісні властивості дорожнього одягу та земляного полотна. Для практичного використання цього принципу є необхідність розробки методу розрахунку та регулювання водно-теплого режиму дорожніх конструкцій для різних умов зволоження з урахуванням сучасних європейських вимог.

Запропоновані методи визначення обсягів вологонакопичення враховують властивості ґрунту з вологопровідності, показник якої визначається, на сьогодні, за застарілими, ще за радянських часів, методами проведення експериментальних досліджень. Наступним кроком авторів в цьому напрямку буде розробка удосконалених методів щодо визначення сезонної вологості ґрунтів в тілі земляного полотна на основі коефіцієнта вологопровідності, визначення якого буде адаптоване до європейського підходу.

Перелік посилань

1. <https://superagronom.com/news/16357-osin-2022-vidznachilas-naybilshoyu-kilkisty-atmosfernoyi-vologizatsii-10-roki>
2. Han-Cheng Dan, Zhi Zhang, Xiang Liu, Jia-Qi Chen. Transient unsaturated flow in the drainage layer of a highway: solution and drainage performance. *Road Materials and Pavement Design*. 2019. Volume 20, Issue 3. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2017.1397049>
3. Xiangtian Xu, Weidong Zhang, Caixia Fan, Ying Lai, Jun Wu. Effect of freeze–thaw cycles on the accumulative deformation of frozen clay under cyclic loading conditions: experimental evidence and theoretical model. *Road Materials and Pavement Design*. 2021. Volume 22, Issue 4. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1696221>
4. Сиденко В.М., Расчет и регулирование водно-теплого режима дорожных одежд и земляного полотна, М: Н-Т изд. Минавтотранса и шос. дорог РСФСР, 1962, 116 с.
5. Пузаков Н.А., Золотарь И.А., Сиденко В.М., Тулаев А.Я. и др. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. М., Транспорт, 1971. 413 с.
6. Сіденко В.М., Фомін В.О. Водно-тепловий режим міських доріг. Харків: Видавництво Харківського університету, 1971. 180 с.
7. Бондаренко Л.П., Кватадзе Є.І. Методи визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів земляного полотна. *Дороги і мости*. Київ, 2022. Вип. 26. С. 138–146. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.138>

DETERMINING MOISTURE ACCUMULATION METHODS IN THE WORKING LAYER OF THE ROAD BED BY TYPES OF MOISTURE

Rutkovska Inessa A., Candidate of Science (Engineering), National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: ria_ntu@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7832-4222>

Kvatadze Evgenia I., PhD student, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: kvatadzev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2798-8955>

Abstract. *Introduction.* The condition of the road surface and its service life are related to the features of the hydrothermal regime, i.e., the density and moisture of the subgrade soil, the values of which change during the annual cycle by depth. In areas with seasonal freezing, several processes occur simultaneously in the road surface and ground surface: heat exchange of moistened material with surface air, diffusion of steam and water in the pores of the material, moisture exchange between the road surface and surface air, infiltration of precipitation through cracks in the surface and surface air, infiltration water into the fabric from the side of the road, capillary water inflow. The water regime of the upper layers of the subsoil also deteriorates due to the complication of soil drying under the waterproof coating, which leads to a decrease in its strength during thawing.

Problem Statement. Ensuring the load-bearing capacity of the ground surface and the evenness of the coverage requires a qualitative solution by determining the volumes of seasonal moisture accumulation in the working layer of the ground surface for the subsequent development of effective constructive measures to regulate VTR due to the diversion and removal of water outside the road structure.

Purpose: conducting an analysis and determining directions for improvement of methods for calculating the volumes of seasonal moisture accumulation, taking into account the heat and moisture exchange processes in the road structure.

Materials and Methods: analytical methods; methods of mathematical modeling; basic provisions of the theory of elasticity; thermo- and hydrodynamics.

Results: in the paper, migration models of seasonal moisture accumulation depending on the origin of sources of moisture were investigated, analysis of existing methods for calculating the field of moisture in the working zone of the subgrade was carried out, and the following directions for their improvement were determined.

Conclusion. The proposed solutions take into account the moisture-conducting properties of the soil, the indicator of which is determined by outdated, even Soviet-era, methods. The next direction of the authors' work is the development of improved methods for determining the seasonal humidity of the soil in the body of the earth bed based on the moisture conductivity coefficient, adapted to the European approach.

Keywords: subsoil, water-thermal regime, soil moisture, moisture accumulation, sources of moisture.

References

1. <https://superagronom.com/news/16357-osin-2022-vidznachilas-naybilshoyu-kilkisty-atmosfernoyivologi-za-ostanni-10-rokiv>
2. Han-Cheng Dan, Zhi Zhang, Xiang Liu, Jia-Qi Chen. Transient unsaturated flow in the drainage layer of a highway: solution and drainage performance. *Road Materials and Pavement Design*. 2019. Volume 20, Issue 3. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2017.1397049>
3. Xiangtian Xu, Weidong Zhang, Caixia Fan, Ying Lai, Jun Wu. Effect of freeze-thaw cycles on the accumulative deformation of frozen clay under cyclic loading conditions: experimental evidence and theoretical model. *Road Materials and Pavement Design*. 2021. Volume 22, Issue 4. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1696221>
4. Sidenko V.M., Raschet i regulirovaniye vodno-teplovogo rezhima dorozhnykh odezhd i zemlyanogo polotna [Calculation and regulation of the water-thermal regime of road pavements and subgrade, M: N-T ed. Ministry of Autotrans and SCO. roads of the RSFSR , 1962, 116 p.] , M: N-T izd. Minavtotransa i shos. dorog RSFSR, 1962, 116 s. [in rusian]
5. Puzakov N.A., Zolotar' I.A., Sidenko V.M., Tulayev A.YA. i dr. Vodno-teplovoy rezhim zemlyanogo polotna i dorozhnykh odezhd [Water-thermal regime of the subgrade and road pavement. M., Transport, 1971. 413 p.]. M., Transport, 1971. 413 s. [in rusian]
6. Sidenko V.M., Fomin V.O. Vodno-teplovyy rezhym mis'kykh dorih. [Water-thermal regime of the city roads. Kharkiv: Kharkiv: Kharkiv University Publishing House, 1971. 180 p.] Kharkiv: Vydavnytstvo Kharkivs'koho universytetu, 1971. 180 s. [in Ukrainian]
7. Liudmyla Bondarenko, Yevheniia Kvatadze. Methods of determining the coefficient of moisture conductivity of soils subgrade. *Dorogi i mosti [Roads and bridges]*. Kyiv, 2022. Iss. 26. P. 138–146. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.138>.