

УДК 625.731
UDC 625.731

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-126-136

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ ОСНОВИ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ
НА ПОКАЗНИКИ МІЦНОСТІ І ДЕФОРМАТИВНОСТІ ЙОГО КОНСТРУКЦІЇ**

**STUDY OF THE INFLUENCE OF SUBGRADE SOIL MOISTURE ON THE STRENGTH
AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF PAVEMENT STRUCTURE**



Петрович Володимир Васильович, кандидат технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: petrovichvv60@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0003-0422-2535>



Касай Костянтин Іванович, аспірант, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: kasai2709@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0003-3292-3339>

Анотація: У статті досліджено вплив вологості ґрунту основи дорожнього одягу на показники міцності і деформативності конструкції дорожнього одягу.

Актуальність. В Україні близько 99 % автомобільних доріг мають нежорсткий дорожній одяг, тобто конструкція якого містить шари, міцність яких залежить від температури, вологості та часу дії навантаги. Вологість ґрунту основи дорожнього одягу є одним із тих чинників від якого залежить надійність його конструкції і довговічність експлуатування. Питання забезпечення надійної роботи дорожньої конструкції і потрібних транспортно-експлуатаційних показників автомобільної дороги є актуальним в усіх країнах світу й особливо в Україні на сучасному етапі, враховуючи, що повітряний транспорт не функціонує і більшість перевезень виконується автомобільним транспортом.

Проблематика. Сучасна експлуатація автомобільних доріг потребує підвищеної уваги до процесів вологоперенесення у ґрунтах основи дорожнього одягу, адже від цього безпосередньо залежать його міцнісні та деформативні характеристики. Проникнення атмосферних опадів у товщу дорожньої конструкції призводить до зміни вологості й щільності ґрунту, що впливає на його несну здатність.

Ґрунтова основа є ключовим елементом дорожнього одягу, який виконує роль фундаменту всієї конструкції. Будь-які зміни її фізико-механічного стану, викликані зволоженням або перезволоженням, накопичуються впродовж стоку експлуатації автомобільної дороги та проявляються у вигляді тріщин, руйнувань шарів дорожнього одягу, колійності тощо.

Мета. Дослідити на реальній конструкції дорожнього одягу вплив вологості ґрунту його основи на його міцнісні і деформативні показники. Також виконати моделювання зміни цих показників від зміни виду ґрунту основи і його вологості.

Висновки. Аналіз наукових публікацій, присвячених тематиці дослідження, виконаних лабораторних досліджень, числових розрахунків і математичного моделювання свідчить, що однією із

умов гарантованої міцності дорожнього одягу, є забезпечення достатньої міцності його ґрунтової основи. Щодо досягання забезпеченням твердого стану ґрунтів, як під час будівництва (для супіщаних ґрунтів розрахункову вологість рекомендується приймати не більше ніж 60 % від вологості на межі текучості, для глинистих – 55 %), так і під час експлуатування автомобільної дороги.

Ключові слова: автомобільна дорога, активне напруження, водно-тепловий режим, вологість, ґрунт, дорожній одяг, земляне полотно, модуль пружності, показник, робочий шар, фізико-механічні властивості.

Вступ. На сучасному етапі в дорожній галузі України виконують тільки роботи з експлуатаційного утримання автомобільних доріг. З часом стан доріг погіршується і забезпечення міцності конструкції дорожнього одягу завжди залишається актуальним питанням, як під час проектування і нового будівництва доріг, так і під час їхнього ремонтування та експлуатування.

В Україні близько 99 % автомобільних доріг мають нежорсткий дорожній одяг, тобто конструкція якого містить шари, міцність яких залежить від температури, вологості та часу дії навантаги [1].

Саме вологість ґрунтів робочого шару земляного полотна, які є основою для шарів дорожнього одягу, є одним із чинників від якого залежать фізико-механічні властивості ґрунту і відповідно загальний модуль пружності конструкції дорожнього одягу та її споживчі властивості.

Одним із основних джерел потрапляння вологи у дорожній одяг є опади, особливо для автомобільних доріг, які проходять в насипах. Дощова вода потрапляє в конструкцію через тріщини, узбіччя, дренажні канали або високе залягання ґрунтових вод. Вода проникає вглиб під дією гравітації, капілярних сил, осмотичного тиску та різниці температур і тисків.

Виклад основного матеріалу. Питанню впливу вологості ґрунтів на міцність дорожньої конструкції та зміни цієї вологості, зокрема від дії атмосферних опадів присвячено багато робіт як в Україні, так і за кордоном. Зокрема у Швеції з цього питання було виконано масштабне дослідження [2] з використанням пересувної установки Heavy Vehicle Simulator (HVS-Nordic), результати дослідження показали, що вологість здатна істотно змінювати стійкість незв'язаних зернистих матеріалів до залишкових деформацій і утворення колії.

Проникність дорожніх матеріалів зазвичай зростає вниз від поверхні покриття до глибини близько 0,7 м. За оцінками авторів [3], близько 80 % проблем у дорожніх конструкціях пов'язані з наявністю води. Якщо вода накопичується на слабопроникному шарі, верхні шари залишаються вологими, а їх замерзання спричиняє руйнування. Негативний вплив вологи і зниження несної здатності та довговічності, зокрема асфальтобетонного покриття розглянутий в роботах [4, 5].

Charlie та інші [6] змоделивали реакцію дорожнього одягу за різного вмісту вологи й показали, що збільшення вологості з 2,3 % до 4,8 % підвищує деформації приблизно на 60 %. Chen та інші [7] встановили, що модуль пружності основи знижується приблизно на 30 % при кожному підвищенні вологості на 1 %.

Salour і Erlingsson [8] збрали дані, які показали чіткий зв'язок між вологістю та жорсткістю незв'язаних шарів. Зворотний розрахунок даних FWD (Falling Weight Deflectometer) показав зниження жорсткості ґрунтів основи на 63 % і зернистого шару на 48 % у період весняного відтавання порівняно з літніми значеннями. Було зафіксовано різке збільшення прогинів у цей період: максимальні значення зросли у 4,7 рази від повністю мерзлого стану до відталого шару основи.

Rahman M.M. та інші [9] також з використанням зворотного розрахунок даних FWD в польових умовах, а також тривісного стиснення ґрунтів в лабораторних умовах отримали залежності модуля пружності від CBR для різної вологості ґрунту основи і її впливу на колієутворення.

У роботі [10] автори виконали дослідження, як зміна температури та вологості впливають на несну здатність конструкції дорожнього одягу. Одними із результатів стали такі висновки: найбільший вплив на структурну міцність дорожнього одягу мали: несна здатність ґрунту основи, його чутливість до гідротермічного впливу, товщина асфальтобетонних шарів і загальна товщина дорожнього одягу. Вплив незв'язаних шарів був незначний. Також було отримано, що сезонний вплив на міцність дорожнього одягу через зміну несної здатності ґрунту основи зберігався навіть після корекції

жорсткості асфальтобетонних шарів залежно від температури шару. Було встановлено, що більша жорсткість асфальтобетонних шарів восени та навесні була недостатньою, щоб компенсувати зменшення міцності дорожнього одягу через зниження несної здатності ґрунту.

В Україні тематиці водно-теплогового режиму дорожньої конструкції, впливу вологи від різних джерел зволоження на стан земляного полотна і дорожню конструкцію, у середині двадцятого століття, присвячено фундаментальні праці Сіденка В.М., в останні роки цьому питанню також приділялось багато уваги, зокрема в роботах фахівців ДП «ДерждорНДІ» (нині «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»)) [11-15], Харківського національного автомобільно-дорожнього університету [16] та науковців Національного транспортного університету [17-21]. Причому багато робіт направлені на регулювання водно-теплогового режиму земляного полотна з використанням дренажів мілкого закладання [22-26]. В останніх дослідженнях [27, 28] розроблено метод визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів, який відображає дифузійний рух води і є однією із основних характеристик під час розрахунку водно-теплогового режиму земляного полотна та встановлення вологості ґрунтів.

Тобто питання регулювання водно-теплогового режиму дорожньої конструкції, зокрема вологості ґрунтів основи дорожнього одягу залишається актуальним і потребує подальшого удосконалення.

Метою цього дослідження є оцінювання впливу вологості ґрунтів основи дорожнього одягу на його несуну здатність. Для досліджень було взято дані ДП «НІРІ» з польового обстеження конструкції дорожнього одягу на автомобільній дорозі загального користування державного значення Н-25 Городище – Рівне – Старокостянтинів, які виконували для надання рекомендацій щодо забезпечення належних умов експлуатування одного із комплексів зважування в русі. З метою оцінювання стану і несної здатності природної основи та встановлення причин наявних деформацій дорожнього одягу були проведені інженерно-геологічні вишукування на основі удосконаленої методики динамічного зондування ґрунтів, відбирання кернів із покриття і шарів дорожнього одягу, геофізичне дослідження дорожньої конструкції на ділянці (рис. 1).

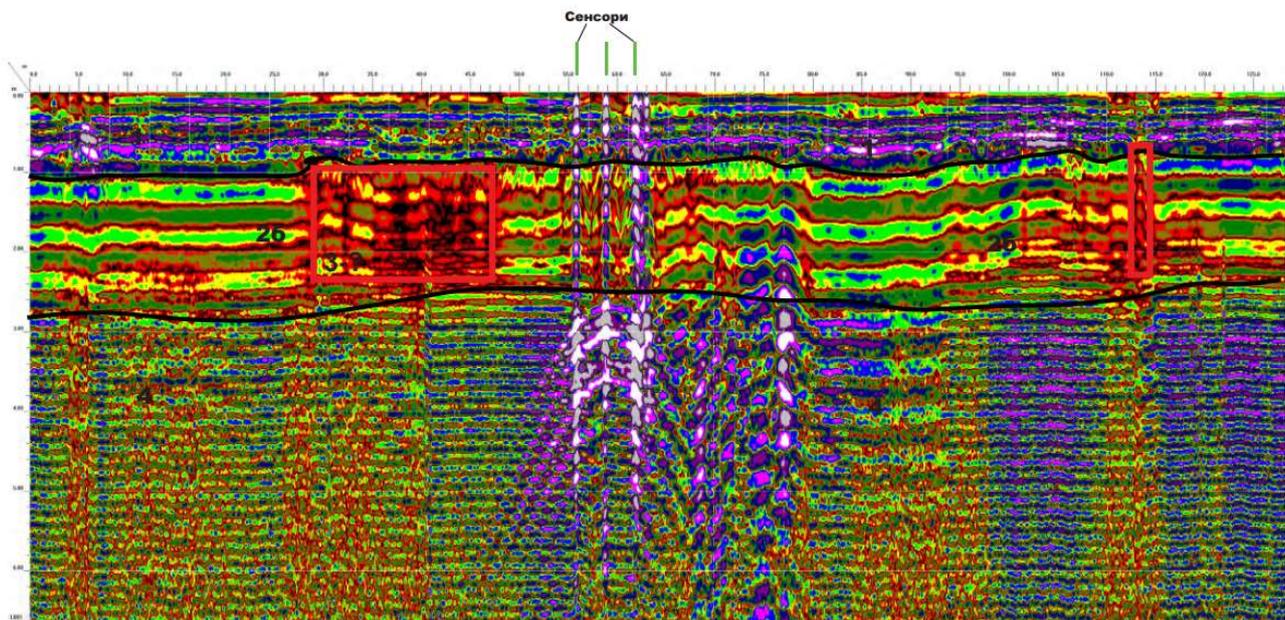


Рисунок 1 – Геофізичний профіль ґрунтової основи та земляного полотна, на ділянці дослідження

Figure 1 – Geophysical profile of the soil base and subgrade at the study site

Графіки опору ґрунту зондуванню зображені на рис. 2.

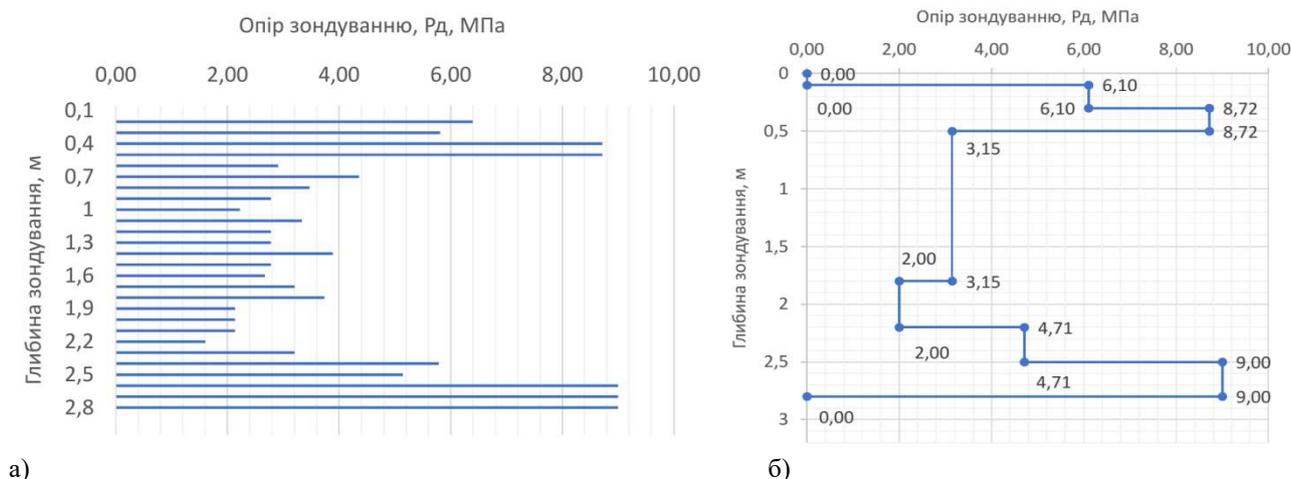


Рисунок 2 – Столпчиковий (а) і поінтервальний (б) графіки зміни умовного опору зондуванню, МПа за глибиною
Figure 2 – Columnar (a) and interval (b) graphs of changes in the conditional resistance to probing, MPa by depth

За результатами дослідження встановлено наявність зон із перезволоженим ґрунтом (рис. 1) та, відповідно до рис. 2, що ґрунт земляного полотна на глибині (1,80 – 2,20) м має опір зондуванню 2,00 МПа (перезволожений суглинок пилуватий), що могло бути однією із причин виникнення деформацій на цій ділянці дороги.

Категорія автомобільної дороги на цій ділянці – II, конструкція дорожнього одягу: щебенево-мастиковий асфальтобетон ЦМА-20 на бітумі БМПА 60/90-53 товщиною 5,0 см; асфальтополімербетон щільний на бітумі БМПА 60/90-53 на основі термоеластопластів Тип А – 6,0 см; матеріал за технологією холодного ресайклінгу без додавання мінеральних матеріалів, укріплений цементом М40 – 16,0 см; щебенево-піщана суміш, укріплена цементом М40 – 15,0 см; щебенево-піщана суміш С5 – 21,0 см; ПГС згідно з ДСТУ Б В.2.7-30 – 15,0 см; суглинок важкий пилуватий.

Міцнісні і деформаційні показники зазначеної вище конструкції дорожнього одягу від зміни вологості ґрунту основи наведені на рис. 3.

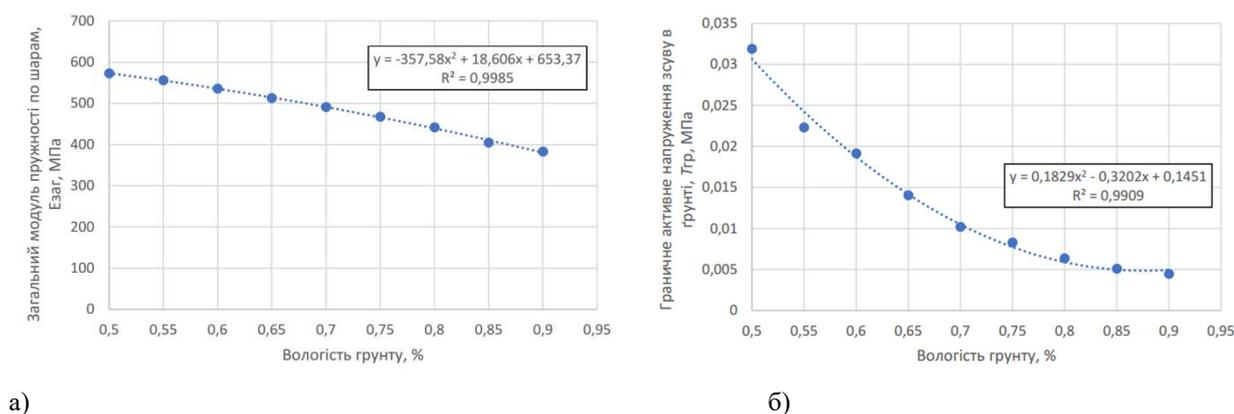
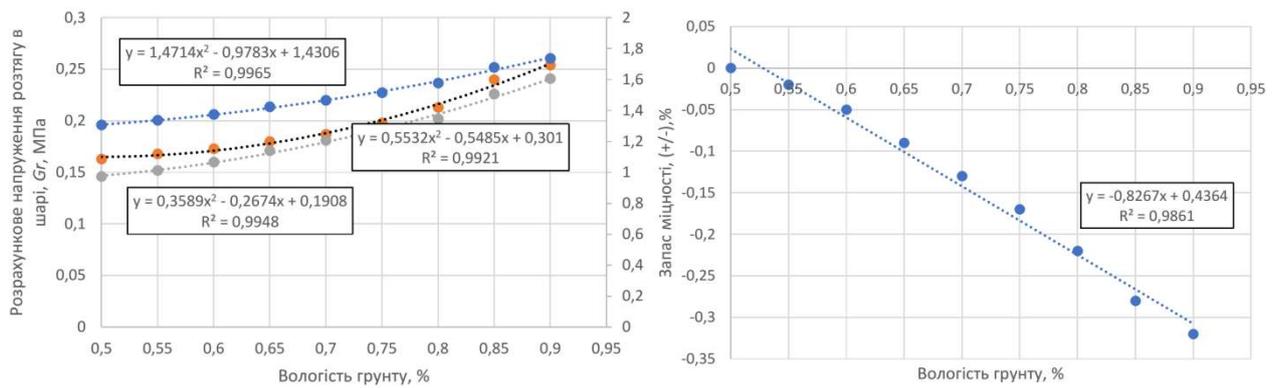
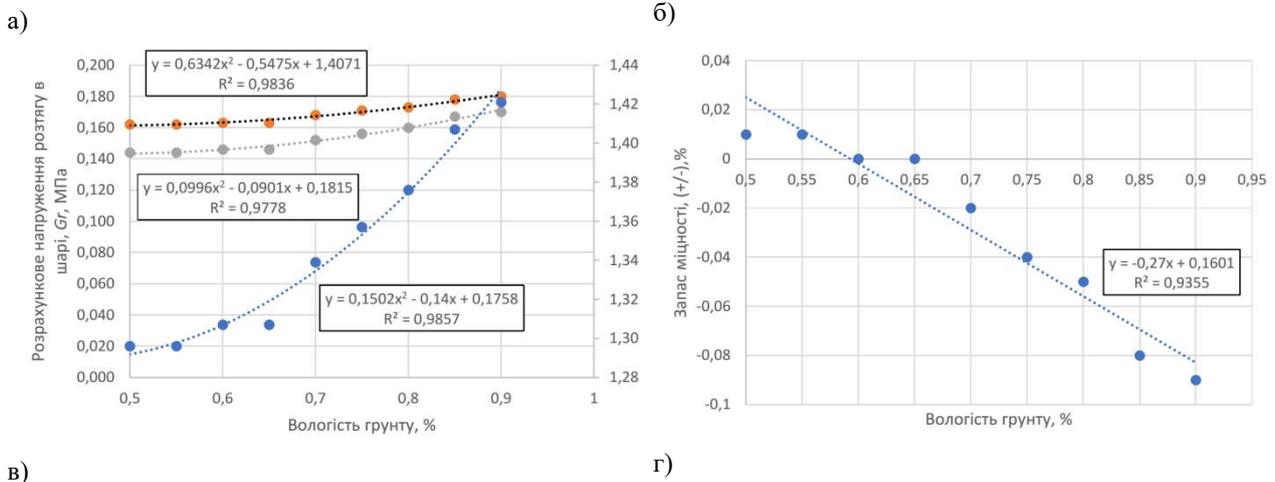
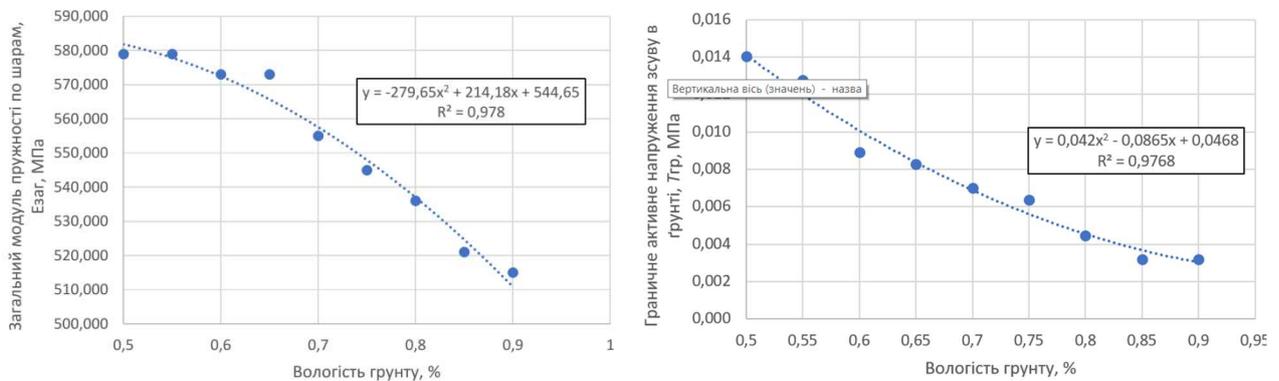


Рисунок 3 – Залежність показників конструкції дорожнього одягу від вологості ґрунту основи (суглинок важкий пилуватий): а) загальний модуль пружності дорожнього одягу; б) граничне активне напруження зсуву в ґрунті; в) розрахункові напруження розтягу у зв'язних шарах (для синього графіка (шар асфальтобетону) шкала справа); г) запас міцності конструкції дорожнього одягу

Figure 3 – Dependence of road pavement design parameters on subgrade soil moisture content (heavy silty loam): a) total modulus of elasticity of road pavement; b) ultimate active shear stress in soil; c) calculated tensile stress in cohesive layers (for the blue graph (asphalt concrete layer), see the scale on the right); d) safety factor of road pavement structure



В) Г)
Рисунок 3 (продовження)
Figure 3 (continued)



В) Г)

Рисунок 4 – Залежність показників конструкції дорожнього одягу від вологості ґрунту основи (супісок пилуватий): а) загальний модуль пружності дорожнього одягу; б) граничне активне напруження зсуву в ґрунті; в) розрахункові напруження розтягу у зв'язних шарах (для синього графіка (шар асфальтобетону) шкала справа); г) запас міцності конструкції дорожнього одягу

Figure 4 – Dependence of road pavement design parameters on subgrade soil moisture content (silty sandy loam): a) total modulus of elasticity of road pavement; b) ultimate active shear stress in soil; c) calculated tensile stress in cohesive layers (for the blue graph (asphalt concrete layer), see the scale on the right); d) safety factor of road pavement structure

Для порівняння, для цієї ж конструкції дорожнього одягу було виконано розрахунки для інших, поширених на території України, видів ґрунтів (глина піщаниста, суглинок легкий пілуватий, супісок пілуватий, супісок легкий, пісок дрібнозернистий пілуватий). Зокрема для супіску пілуватого результати наведені на рис. 4.

Аналіз результатів математичного моделювання показує, якщо ґрунт знаходиться в твердому стані, незалежно від виду ґрунту, міцнісні і деформаційні показники конструкції дорожнього одягу змінюються не значно.

Наприклад, для дослідної ділянки ґрунт суглинок важкий пілуватий (вологість на межі текучості 38 %, вологість на межі розкочування 20 %), за зміни вологості з 19 % до 20,5 % (тобто ґрунт із твердого стану перейшов на межу напівтвердого) загальний модуль пружності дорожньої конструкції майже не змінюється з 573 МПа до 556 МПа (у межах похибки вимірювання) див. рис. 3, те ж стосується і розрахункових напружень розтягу у зв'язних шарах конструкції, але суттєво знизилось граничне активне напруження зсуву в шарі ґрунту – майже на 43 % та запас міцності конструкції (рис. 3). Стан значно погіршується, якщо ґрунт переходить у м'якопластичний стан, зокрема за збільшення вологості даного суглинка до 30,8 % загальний модуль пружності дорожньої конструкції зменшується майже на 30 %, розрахункові напруження розтягу у зв'язних шарах конструкції зростають для різних шарів від 20 % до 50 %, граничне активне напруження зсуву в шарі ґрунту зменшилось у 4 рази, а запас міцності конструкції впав до – 22 %.

Ця ж тенденція прослідковується і для інших видів глинистих ґрунтів, тільки для ґрунтів із більшим числом пластичності усі показники значно погіршуються, із зменшенням числа пластичності, тобто для супісків, дорожня конструкція стає менш чутливою до зміни вологості в межах твердого – м'якопластичного стану із середнім показником пластичності 0,6.

Отримані дані корелюють і підтверджують тезу Литвиненка А.С. [11, 12], який на комплексному аналізі великого діапазону зв'язних ґрунтів за числом пластичності, отриманому як у лабораторних умовах, так на дорожніх об'єктах, рекомендує щоб вологість ґрунтів в основі дорожнього одягу, навіть за додаткового зволоження в процесі експлуатації, не перевищувала вологості, яка відповідає твердому стану зв'язних ґрунтів за показником текучості.

Таблиця 1 – Рекомендовані розрахункові значення показників деформативності і міцності ґрунтів для розрахунку жорстких і нежорстких дорожніх одягів

Table 1 – Recommended calculated values of soil deformability and strength indicators for calculating rigid and non-rigid road pavements

| Вид ґрунту за числом пластичності, I_p | Конструктивний елемент | Показники міцності і деформативності | Показник текучості, I_L | Показник відносної ущільненості, K_d |
|--|--------------------------------|--|---------------------------|--|
| | | | | $1,1 > K_d > 1,0$ |
| $I_p < 12$ | Робочий шар | E , МПа φ , град c , кПа | $-0,75 \leq I_L < -0,25$ | ≥ 100 ≥ 30 ≥ 35 |
| | Інша частина земляного полотна | E , МПа φ , град c , кПа | $-0,25 \leq I_L < 0$ | ≥ 85 ≥ 25 ≥ 22 |
| $I_p \geq 12$ | Робочий шар | E , МПа φ , град c , кПа | $-0,15 \leq I_L < -0,05$ | ≥ 140 ≥ 22 ≥ 70 |
| | Інша частина земляного полотна | E , МПа φ , град c , кПа | $-0,05 \leq I_L < 0$ | ≥ 120 ≥ 18 ≥ 40 |

Орієнтовний вигляд таблиці розрахункових значень показників деформативності і міцності ґрунтів для розрахунку жорстких і нежорстких дорожніх одягів згідно з [12] наведений у табл. 1.

У табл. 1 число пластичності, показники текучості й ущільненості розраховуємо за відомими формулами:

$$I_p = W_L - W_p$$

$$I_L = (W - W_p) / I_p \quad (1)$$

$$K_d = (e_{wL} - e) / (e_{wL} - e_{wp}),$$

де I_p – число пластичності;

W_L – вологість на межі текучості;

W_p – вологість на межі розкочування;

I_L – показник текучості;

K_d – показник відносної ущільненості;

e , e_{wL} , e_{wp} – коефіцієнт пористості ґрунту і за вологостей на межі текучості і розкочування відповідно.

Висновок. Забезпечення якісних споживчих властивостей автомобільної дороги завжди залишається актуальною вимогою суспільства. Одним із елементів, який безпосередньо впливає на безпеку, швидкість і комфортність дорожнього руху є дорожній одяг. Стан його покриву та міцність конструкції забезпечують зазначені вище властивості.

Аналіз літературних джерел, результатів виконаних лабораторних досліджень, числових розрахунків і математичного моделювання свідчить, що однією із умов гарантованої міцності дорожнього одягу, є забезпечення достатньої міцності його ґрунтової основи. У розвиток цього потрібно, з одного боку забезпечити щільність ґрунту під час спорудження земляного полотна із розрахунковою вологістю, яка менша рівна вологості на межі розкочування щоб забезпечити твердий стан ґрунту, $I_L < 0$, з іншого – вжиття всіх заходів на всіх етапах життєвого циклу дороги для мінімізації чи унеможливлення перезволоження ґрунтів основи дорожнього одягу, зокрема вологою від інфільтрації опадів.

Твердий стан зв'язних ґрунтів забезпечує достатні значення показників механічної міцності і деформативності ґрунтів для забезпечення як загальної міцності і стійкості насипного ґрунту, так і розташованої на ньому дорожньої конструкції. При чому для супіщаних ґрунтів їхню розрахункову вологість рекомендується приймати не більше ніж 60 % від вологості на межі текучості, тобто $W_{роз} \leq 0,6 W_L$, для глинистих – 55 %.

Перелік посилань

1. ДСТУ 9214:2023 Автомобільні дороги. Терміни та визначення понять. Київ, 2023. 47 с. (Інформація та документація).
2. Wiman L.G. Accelerated Load Testing of Pavements: HVS-NORDIC Tests at VTI Sweden 2003–2004. VTI Rapport 544A. 2006. Available online: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:670625/FULLTEXT01.pdf> (останній час звернення 20.05.2025).
3. Birgisson B., Ruth B. Improving performance through consideration of terrain conditions: Soils, drainage, and climate. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 2003, 1819, 369–377. <https://doi.org/10.3141/1819b-47>.
4. Charlier R., Hornych P., Sršen M., Hermansson Å., Bjarnason G., Erlingsson S., Pavšič P. Water influence on bearing capacity and pavement performance: Field observations. In *Water in Road Structures*. Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2009. P. 175–192. (Scopus)

https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_8

5. Dawson A., Kringos N., Scarpas T., Pavšič P. Water in the pavement surfacing. In *Water in Road Structures*. Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2009. P. 81–105. (Scopus)

https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_5

6. Charlier R., Laloui L., Brenčič M., Erlingsson S., Hansson K., Hornych P. Modelling coupled mechanics, moisture and heat in pavement structures. In *Water in Road Structures*; Springer: Dordrecht, The Netherlands. 2009. P. 243–282. (Scopus)

https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_11

7. Chen D.H., Sun R., Yao Z. Impacts of aggregate base on roadway pavement performances. *Constr. Build. Mater.* 2013. 48. 1017–1026. (Scopus)

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.101>

8. Salour F., Erlingsson S. Investigation of a pavement structural behaviour during spring thaw using falling weight deflectometer. *Road Mater. Pavement Des.* 2013. 14. 141–158. (Scopus)

<https://doi.org/10.1080/14680629.2012.754600>

9. Rahman M.M., Gassman S.L., Islam K.M. Effect of Moisture Content on Subgrade Soils Resilient Modulus for Predicting Pavement Rutting. *Geosciences*. 2023. 13. 103. (Scopus)

<https://doi.org/10.3390/geosciences13040103>

10. Vaitkus A., Žalimienė L., Židanaviciute J., Žilionienė D. Influence of Temperature and Moisture Content on the Variation of Bearing Capacity of Pavements. *Materials*. 2019. 12. 3826. (Scopus)

<https://doi.org/10.3390/ma12233826>

11. Литвиненко А.С. Про фізичний зміст необхідної і достатньої величини густини сухого ґрунту зв'язних ґрунтів при спорудженні земляного полотна автомобільних доріг. *Автошляховик України*. 2011. № 4 (222). С. 21–27.

12. Литвиненко А.С. Про необхідність відмови від визначення розрахункових показників міцності і деформативності зв'язних ґрунтів відповідно до їх вологості на границі текучості. *Автошляховик України*. 2013. № 1 (231). С. 43–46.

13. Литвиненко А.С. Про вплив стану ґрунтових основ на стан дорожніх одягів на ділянках автомобільних доріг у нульових відмітках і невисоких насипах. *Автошляховик України*. 2014. № 6 (242). С. 35–39.

14. Kaskiv V., Havryshchuk V. Mathematical model for the duration of runoff formation determined from the road surface. *Heliyon*. Volume 6, ISSUE 12, E05687, December 01, 2020 (Scopus)

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05687>

15. Каськів В. І., Касай К. І. Аналіз підходів щодо оцінювання просочування опадів у ґрунт узбіччя автомобільних доріг. *Дороги і мости*. 2024. Вип. 30. С. 253–263.

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.253>

16. Процюк В. О. Прогнозування несучої здатності дорожніх одягів на ділянках з надмірним зволоженням ґрунтів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2013. Вип. 89. С. 24–32.

17. Бубела А. В. Дослідження закономірностей зволоження дорожньої конструкції та методи його регулювання. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2019. Вип. 105. С. 44–48.

18. Славінська О. С., Бубела А. В., Бондаренко Л. П., Чечуга О. С. Прогнозування режиму водовідведення з дорожньої конструкції. *Автошляховик України*. 2020. Вип. 3. С. 28–36.

<https://doi.org/10.33868/0365-8392-2020-3-263-28-36>

19. Петрович В. В. Касай К. І. Дослідження характеристик опадів для розрахунків поверхневого водовідведення й інфільтрації вологи в ґрунт земляного полотна автомобільних доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2024. Вип. 115. Частина 2. С. 137–146.

<https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.2-137-146>

20. Савенко В. Я., Каськів В. І. Вплив опадів на розподіл вологості ґрунтів верхньої частини земляного полотна. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1997. Вип. 54. С.6–11.

21. Каськів В. І. Удосконалення показників робочої зони високих насипів з врахуванням інфільтрації атмосферних опадів : дис... канд. техн. наук : 05.22.11. К., 1998. 286 с.
22. Стьожка В. В. Удосконалення методу розрахунку дренажних систем мілкового закладення : дис... канд. техн. наук : спец. 05.22.11. К., 2015. 219 с.
23. Savenko V., Kvatadze A., Davydenko O., Stozhka V., Ianchuk L. Forecasting of the moisture mode of the drainage layer of a road structure under the action of a load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4, No 7 (106). P. 62-75. (Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209421>
24. Slavinska O., Bubela A., Chechuha O., Bondarenko L. The intensity of water removal from shallow drainage systems considering the properties of filler materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 3. 1 (105). (Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203551>
25. Бубела А. В. Методологія проектування поперечних дренажів мілкового закладення з оцінкою якісного стану автомобільної дороги : дис... д-р техн. наук : спец. 05.22.11. К., 2021. 427 с.
26. Славінська О. С., Бубела А. В., Онищенко А. М., Усиченко О. Ю., Стьожка В. В. Удосконалення методу розрахунку параметрів поперечного дренажу мілкового закладення на автомобільних дорогах. *Вісник Національного транспортного університету*. Серія «Технічні науки». 2022. Вип. 1 (51). С. 352–362. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-352-362>
27. Бондаренко Л. П., Кватадзе Є. І. Методи визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів земляного полотна. *Дороги і мости*. 2022. Вип. 26. С. 138–146. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.138>
28. Bubela, A., Bondarenko, L., Kvatadze, Y., Stozhka, V., Ivko, A. (2024). Devising a method for determining the moisture conductivity coefficient of subgrade soils taking into account European approaches and standards. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (131)), 80–89. (Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.314117>

STUDY OF THE INFLUENCE OF SUBGRADE SOIL MOISTURE ON THE STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF PAVEMENT STRUCTURE

Petrovych Volodymyr V., Candidate of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Professor of the Transportation Construction and Property Management Department, National Transport University. e-mail: petrovichvv60@ukr.net, tel. +380442807338, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovycha Pavlenka, 1, room 138, <https://orcid.org/0000-0003-0422-2535>

Kasai Kostiantyn I., National Transport University, postgraduate student, e-mail: kasai2709@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3292-3339>

Summary. The article examines how the moisture content of the pavement subgrade affects the strength and deformation performance of the overall pavement structure.

Relevance. In Ukraine, about 99 % of public roads have flexible pavement, whose layers exhibit strength properties that vary with temperature, moisture, and duration of applied loads. Moisture in the subgrade soil is therefore a critical factor governing structural reliability and long-term serviceability. Ensuring that a road pavement can sustain required traffic and service conditions is a pressing task worldwide and particularly urgent in Ukraine, where, under current circumstances, air transport does not function as an alternative.

Problem Statement. Modern highway operation calls for close attention to water migration processes in the pavement subgrade, since the subgrade's strength and deformation response depend directly on its moisture regime. Infiltration of precipitation into the pavement body changes soil moisture and density, which in turn affects bearing capacity.

The soil subgrade serves as the foundation for the entire pavement system. Any alterations in its physical and mechanical condition caused by wetting or prolonged oversaturation accumulate over years of service and manifest as cracking, layer disintegration, rutting, and other forms of structural distress.

Objective. The study aims to quantify, on a full-scale pavement section, the influence of subgrade soil moisture on strength and deformation parameters, and to model how these parameters vary depending on soil type and moisture content.

Conclusions. A review of scientific publications, together with laboratory tests, numerical calculations, and mathematical modeling, shows that maintaining adequate strength of the subgrade is a prerequisite for durable pavement performance. This can be achieved by ensuring the soil remains in a sufficiently firm state both during construction and throughout service life. For example, for sandy loam the design moisture content should not exceed about 60 % of the liquid-limit moisture, and for clayey soils about 55 %.

Keywords: highway, active stress, water-thermal regime, moisture, soil, pavement, embankment, modulus of elasticity, indicator, working layer, physical and mechanical properties.

References

1. DSTU 9214:2023 Motorways. Terms and definitions. Kyiv, 2023. 47 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
2. Wiman L.G. Accelerated Load Testing of Pavements: HVS-NORDIC Tests at VTI Sweden 2003–2004. VTI Rapport 544A. 2006. Available online: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:670625/FULLTEXT01.pdf> (last accessed on 20.05.2025).
3. Birgisson B., Ruth B. Improving performance through consideration of terrain conditions: Soils, drainage, and climate. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2003, 1819, 369–377. <https://doi.org/10.3141/1819b-47>.
4. Charlier R., Hornych P., Sršen M., Hermansson Å., Bjarnason G., Erlingsson S., Pavšič P. Water influence on bearing capacity and pavement performance: Field observations. In *Water in Road Structures*. Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2009. P. 175–192. (Scopus) https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_8
5. Dawson A., Kringos N., Scarpas T., Pavšič P. Water in the pavement surfacing. In *Water in Road Structures*. Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2009. P. 81–105. (Scopus) https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_5
6. Charlier R., Laloui L., Brenčič M., Erlingsson S., Hansson K., Hornych P. Modelling coupled mechanics, moisture and heat in pavement structures. In *Water in Road Structures*; Springer: Dordrecht, The Netherlands. 2009. P. 243–282. (Scopus) https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8_11
7. Chen D.H., Sun R., Yao Z. Impacts of aggregate base on roadway pavement performances. *Constr. Build. Mater.* 2013. 48. 1017–1026. (Scopus) <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.101>
8. Salour F., Erlingsson S. Investigation of a pavement structural behaviour during spring thaw using falling weight deflectometer. *Road Mater. Pavement Des.* 2013. 14. 141–158. (Scopus) <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.754600>
9. Rahman M.M., Gassman S.L., Islam K.M. Effect of Moisture Content on Subgrade Soils Resilient Modulus for Predicting Pavement Rutting. *Geosciences*. 2023. 13. 103. (Scopus) <https://doi.org/10.3390/geosciences13040103>
10. Vaitkus A., Žalimiene L., Židanavičiute J., Žilioniene D. Influence of Temperature and Moisture Content on the Variation of Bearing Capacity of Pavements. *Materials*. 2019. 12. 3826. (Scopus) <https://doi.org/10.3390/ma12233826>
11. Litvinenko, A.S. On the physical meaning of the necessary and sufficient density of dry cohesive soils in the construction of road subgrades. *Avtoshlyakhovik Ukrainy*. 2011. No. 4 (222). P. 21–27 [in Ukrainian].
12. Litvinenko A.S. On the need to abandon the determination of the calculated strength and deformability of cohesive soils according to their moisture content at the yield point. *Avtoshlyakhovik Ukrainy*. 2013. No. 1 (231). P. 43–46 [in Ukrainian].

13. Litvinenko A.S. On the influence of the condition of soil foundations on the condition of road pavements on sections of motorways at zero elevations and low embankments. *Avtoshlyakhovyk Ukrainy*. 2014. No. 6 (242). P. 35–39 [in Ukrainian].
14. Kaskiv V., Havryshchuk V. Mathematical model for the duration of runoff formation determined from the road surface. *Heliyon*. Volume 6, ISSUE 12, E05687, December 01, 2020 (Scopus) <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05687>
15. Kaskiw V. I., Kasai K. I. Analysis of approaches to assessing precipitation infiltration into the soil of road shoulders. *Roads and Bridges*. 2024. Issue 30. P. 253–263 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.253>
16. Protsyuk V. O. Forecasting the bearing capacity of road pavements in areas with excessive soil moisture. *Motorways and Road Construction*. 2013. Issue 89. P. 24–32 [in Ukrainian].
17. Bubela A. V. Research on the patterns of road structure moisture and methods of its regulation. *Motorways and Road Construction: Scientific and Technical Collection*. 2019. Issue 105. P. 44–48 [in Ukrainian].
18. Slavinska O. S., Bubela A. V., Bondarenko L. P., Chechuga O. S. Forecasting the drainage regime from road structures. *Avtoshlyakhovyk Ukrainy*. 2020. Issue 3. P. 28–36 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2020-3-263-28-36>
19. Petrovich V. V., Kasai K. I. Research on precipitation characteristics for calculating surface drainage and moisture infiltration into the subgrade of motorways. *Motorways and Road Construction*. 2024. Issue 115. Part 2. P. 137–146 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.2-137-146>
20. Savenko V. Ya., Kaskiv V. I. The influence of precipitation on the distribution of soil moisture in the upper part of the roadbed. *Motorways and Road Construction*. 1997. Issue 54. P. 6–11 [in Ukrainian].
21. Kaskiw V. I. Improvement of the performance of the working area of high embankments taking into account the infiltration of atmospheric precipitation: dissertation... Candidate of Technical Sciences: 05.22.11. Kyiv, 1998. 286 p. [in Ukrainian].
22. Stizhka V. V. Improvement of the method for calculating shallow drainage systems: dissertation... Candidate of Technical Sciences: specialty 05.22.11. Kyiv, 2015. 219 p. [in Ukrainian].
23. Savenko V., Kvatadze A., Davydenko O., Stozhka V., Ianchuk L. Forecasting of the moisture mode of the drainage layer of a road structure under the action of a load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4, No 7 (106). P. 62-75. (Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209421>
24. Slavinska O., Bubela A., Chechuha O., Bondarenko L. The intensity of water removal from shallow drainage systems considering the properties of filler materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 3. 1 (105). (Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203551>
25. Bubela, A. V. Methodology for designing shallow cross drains with assessment of the quality of motorways: dissertation... Doctor of Technical Sciences: specialty 05.22.11. Kyiv, 2021. 427 p. [in Ukrainian].
26. Slavinska O. S., Bubela A. V., Onishchenko A. M., Usichenko O. Yu., Stiozka V. V. Improvement of the method for calculating the parameters of shallow cross drainage on motorways. *Bulletin of the National Transport University*. Series “Technical Sciences.” 2022. Issue 1 (51). P. 352–362 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-352-362>
27. Bondarenko L. P., Kvatadze E. I. Methods for determining the moisture conductivity coefficient of subgrade soils. *Roads and Bridges*. 2022. Issue 26. Pp. 138–146 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.138>
28. Bubela, A., Bondarenko, L., Kvatadze, Y., Stozhka, V., Ivko, A. (2024). Devising a method for determining the moisture conductivity coefficient of subgrade soils taking into account European approaches and standards. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (131)), 80–89. (Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.314117>

Дата надходження до редакції 22.05.2025.