

УДК 625.7

**МОДЕЛЮВАННЯ МІГРАЦІЇ ВОДИ В УЩІЛЬНЕНОМУ
ГЛИНИСТОМУ НАСИПУ**

**WATER MIGRATION MODELING IN THE COMPACTED CLAY
EMBANKMENT**

**Винников Ю.Л., д.т.н., проф., Коваленко В.І., к.т.н., доц.,
Литвиненко Т.В., аспірант (Полтавський національний технічний
університет імені Юрія Кондратюка, м. Полтава)**

**Vynnykov Y.L., doctor of technical sciences, prof., Kovalenko V.I., Ph.D.,
Associate professor, Lytvynenko T.V., post-graduate student (Poltava National
Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava)**

Розроблено й реалізовано методику фізичного моделювання міграції води за товщиною дорожнього насипу шляхом досліджень змін у часі вологості суглинку важкого пилюватого, вміщеного в пластмасові труби висотою 1,5 м й ущільненого за коефіцієнта водонасичення $S_r = 0,85$ до щільності скелета ґрунту $\rho_d = 1,50 - 1,65 \text{ г/см}^3$. Отримано нові дослідні дані вологості ущільненого суглинку за висотою труби через два місяці «відпочинку» для кожної величини щільності скелета ґрунту.

Method of physical water migration modeling for thickness of road embankment by over time research changes of silty clay loam moisture, placed in plastic tubes height of 1,5 m and compacted by water saturation factor $S_r = 0,85$ to soil skeleton density $\rho_d = 1,50 - 1,65 \text{ g/cm}^3$ is developed and implemented. New experimental data of compacted loam moisture for the height of tube in two months "rest" for each soil skeleton density value are obtained.

Ключові слова:

Дорожній насип, укочування, міграція води, деформація, вологість, суглинок, максимальна молекулярна вологомісткість ґрунту, щільність скелета ґрунту.
Road embankment, rolling, water migration, deformation, moisture, loam, maximum molecular moisture capacity, soil skeleton density.

Вступ. Для тривалої експлуатації дорожнього насипу важливі не лише максимально досягнуті при пошаровому укочуванні значення його щільності скелета ґрунту та міцності, а й збереження їх протягом нормативного часу експлуатації [1, 2]. На стан ущільненого ґрунту насипу в часі істотно впливає

вологість, при якій його ущільнювали, й кількісне співвідношення окремих видів порової води в ґрунті. Тому актуальною задачею зведення ґрунтових споруд є забезпечення їх тривалої міцності, тобто, коли за нормативний час експлуатації зберігаються отримані після ущільнення величини механічних параметрів ґрунту, а наднормативні деформації споруд не виникають [3, 4].

Аналіз останніх досліджень. Раніше автори [5] встановили, що якщо ґрунт ущільнювали при вологості меншій за максимальну кількість зв'язаної води, то електричний потенціал поверхні твердих частинок не використано, і вони здатні збільшити товщину плівок зв'язаної води до максимально можливого значення при додатковому зволоженні ґрунту під час експлуатації ґрунтового масиву. Збільшення товщини плівок зв'язаної води призводить до збільшення початкового об'єму ущільненого ґрунту та деформації масиву. Якщо ущільнення ґрунту виконано при вологості, що значно перевищує максимальну кількість зв'язаної води, то електричний потенціал поверхні твердих частинок повністю використаний, система має нейтральний заряд, а товщина плівок зв'язаної води – максимальну величину. Наявність значної кількості вільної води призводить до того, що з часом ця вода під дією гравітації, власної ваги ґрунту та зовнішніх навантажень витискається з пор. Це сприяє додатковому ущільненню ґрунту за рахунок більш компактного розміщення твердих частинок. Відповідно міцність ґрунту зростає, та мають місце нерівномірні деформації. Таким чином, найбільш сприятливою умовою забезпечення тривалої міцності ґрунтів дорожнього насипу та мінімальних деформацій під час його експлуатації є ущільнення ґрунту при вологості близькій до максимального вмісту зв'язаної води.

А.Ф. Лебедев [6] вважав, що дослідники точно не встановили навіть види ґрунтів за вологоємністю, не кажучи вже про їх точну фізичну класифікацію. П. Коссович виділив види вологоємності: найбільшу; відносну; найменшу, – вказуючи, що цей поділ «не відповідає загальноприйнятим у ґрунтознавстві поняттям про найменшу та найбільшу (за А. Майєром) вологоємність». К.Д. Глінка теж виділив три види вологоємності: найменшу; відносну; найбільшу, – причому найменша вологоємність – це «та кількість води, яку акумулює ґрунт тоді, коли вода знаходиться в ньому в плівковому стані».

Однак, таке визначення позбавлене точного фізичного сенсу, як і саме поняття «плівкова» вода. Доцільно встановити різні види вологоємності у зв'язку зі змінами властивостей ґрунтової вологи, що відноситься до того чи іншого виду вологоємності, як-то гігроскопічна вологоємність, максимальна молекулярна вологоємність і т. ін.

Через те, що подвійна максимальна гігроскопічність лежить в межах між максимальною гігроскопічністю та максимальною молекулярною вологоємністю, тобто, де не відбувається якісних змін у стані ґрунтової вологи, то ймовірно, що фізіологічно корисна вологість повинна збігатися з максимальною гігроскопічністю, де ґрунтова вологість різко змінює фізичні властивості. Вказане міркування підтверджено даними Г. Мітчерліха, який

показав, що рослини вмирають від відсутності води лише тоді, коли в ґрунті залишається лише гігроскопічна волога. Іншу картину маємо у випадку, коли механічні елементи дотичних шарів мають різномірний характер [7, 8].

Постановка мети і задач досліджень. На цій теоретичній базі у квітні – червні 2014 р. авторами за методом одночинникового планування проведено фізичне моделювання, що мало за мету розробку нових оптимальних критеріїв ущільнення, за яких забезпечується тривала міцність глинистих ґрунтів дорожнього насипу. Зокрема, досліджувалась можлива міграція води за товщиною цього насипу у часі (протягом двох місяців) в ущільненому глинистому ґрунті, вміщеному в пластмасові труби висотою 1,5 м (тобто, імітувався пошарово ущільнений ґрунт дорожнього насипу).

Методика досліджень. При підготовці визначено природну вологість дослідного ґрунту, його вологість на межі текучості та розкочування. Ґрунт – суглинок важкий пілуватий, твердий з такими індикаційними показниками: початкова вологість $w_0=0,115$; вологість на межі текучості $w_L=0,354$; вологість на межі розкочування $w_p=0,192$; число пластичності $I_p=0,162$. Щільність скелета ґрунту приймали за змінний чинник, а початкове значення коефіцієнта водонасичення ґрунту в усіх дослідах доводили до $S_r=0,85$. Відповідно вологість ґрунту в кожному досліді мала змінне значення, а саме при: щільності скелета ґрунту $\rho_d=1,50 \text{ г/см}^3 - w=0,250$; $\rho_d=1,55 \text{ г/см}^3 - w=0,231$; $\rho_d=1,60 \text{ г/см}^3 - w=0,214$; $\rho_d=1,65 \text{ г/см}^3 - w=0,198$.

Для реалізації роботи використано: ваги; пульверизатор ручний; 40 ланок пластмасових труб розміром 50 мм (зовнішній діаметр) \times 150 мм (довжина кожної ланки); металева стійка; лоток для дренажу; ручна трамбівка; шпатель. Внутрішній діаметр труб склав 46,4 мм. Його приймали в розрахунках вихідної маси ґрунту для заповнення певного об'єму труб. Заповнення ґрунтом труб здійснювали послідовно на висоту по 3 см. Задаючись щільністю скелета ґрунту та його вологістю, розраховували (див. табл. 1) для відповідного об'єму масу ґрунту природної вологості ($w_0=0,115$) й масу води, яку слід до неї додати, щоб отримати задану вологість w , при якій коефіцієнт водонасичення ґрунту складав $S_r=0,85$.

За даними табл. 1 відібрано й зважено для чотирьох варіантів відповідні маси ґрунту. Його рівномірно зволожували до заданої вологості w , для чого ґрунт перемішували шпателем. Потім порціями його подавали в труби й рівномірно ущільнювали трамбівкою з відповідними позначками за її висотою (рис. 1) кожного разу до товщини 30 мм, після чого ланки труби (по 150 мм) з'єднували до загальної висоти 1,5 м (рис. 2). Ці труби з пошарово ущільненим ґрунтом встановлювали на металеву стійку (рис. 2).

Таблиця 1

Вихідні дані для проведення експерименту із визначення максимальної молекулярної вологомості ущільненого глинистого ґрунту

Задана щільність скелета ґрунту, ρ_d , г/см ³	Відповідний коефіцієнт пористості ґрунту, e	Задана вологість ґрунту W (при $S_r = 0,85$)	Маса порції сухого ґрунту, г	Маса порції ґрунту при $w_0 = 0,115$	Маса порції ґрунту при заданій вологості W	Маса порції води, що додають до порції ґрунту
1,50	0,786	0,250	76,10	84,85	95,12	10,27
1,55	0,729	0,231	78,63	87,67	96,80	9,12
1,60	0,675	0,214	81,17	90,50	98,54	8,04
1,65	0,624	0,198	83,71	93,33	100,28	6,95



Рис. 1. Ручна трамбівка для ущільнення ґрунту



Рис. 2. Труби, заповнені ущільненим ґрунтом з позначенням даних вгорі щодо вихідної щільності скелета ґрунту ρ_d та його заданої вологості W

Нижні кінці всіх труб заводили у дренажний лоток, заповнений гранвідсівом. Таким чином, вільна (незв'язна) вода мала можливість міграції за всією висотою ґрунту в трубі, що імітувало її міграцію у межах товщини дорожнього насипу. Зверху всі пластмасові труби з пошарово ущільненим глинистим ґрунтом герметично закривали для запобігання випаровуванню

води «вгору». Після цього труби з пошарово ущільненим глинистим ґрунтом залишали на металевій стійці в спокої, на, так званий, «відпочинок».

Через два місяці «відпочинку» всі труби розбирали на окремі ланки. З кожної ланки відбирали не менше двох зразків ґрунту в бюкси, за якими нормативним методом вагової вологості визначали кінцеву (стабілізовану) вологість ущільненого глинистого ґрунту W_k за всією висотою труби.

Результати досліджень. Приклади результатів визначення середніх величин кінцевої вологості ущільненого глинистого ґрунту W_k за всією висотою труби для двох значень щільності скелета ґрунту $\rho_d = 1,50 \text{ г/см}^3$ і $1,55 \text{ г/см}^3$ подано у вигляді графіків (рис. 3, 4). Графіки залежності вологості ґрунту W , при якій суглинок ущільнювали та середньої кінцевої вологості ґрунту W_k ущільненого суглинку від ρ_d у межах висоти труби за винятком її верхньої та нижньої ланок подано на рис. 5.

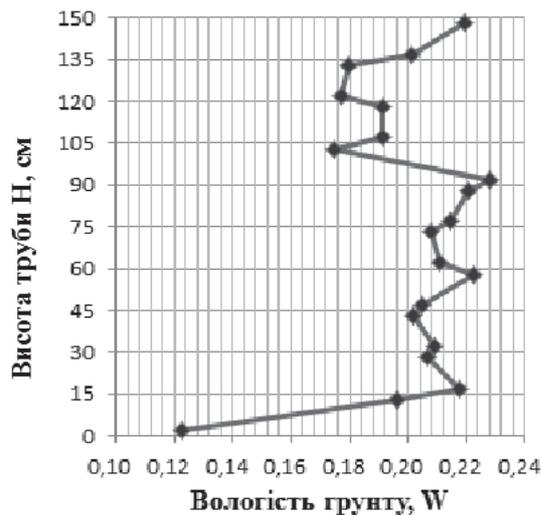


Рис. 3. Залежність вологості ущільненого важкого пілуватого суглинку до щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 \text{ г/см}^3$ після 62 діб витримки

Порівнюючи значення середньої кінцевої вологості ущільненого суглинку W_k за висотою труби через два місяці «відпочинку» з величинами початкової вологості W цього ж ґрунту, зокрема, видно, що:
 – міграція води зумовлена силами гравітації та капілярного підняття вологи (остання пов'язана з силами її поверхневого натягу);

- значення середньої кінцевої вологості w_k ущільненого суглинку порівняно з вологістю w , при якій ґрунт ущільнювали, знизилось для всіх величин щільності скелета ґрунту ρ_d (рис. 5) майже на всю висоту труби за винятком її верхньої ланки, для якої вологість ґрунту наблизилась до значення w_{sat} (яке відповідає коефіцієнту водонасичення $S_r \approx 1,0$) за рахунок капілярного підняття води; вологість ґрунту в нижній ланці труб зменшилась до $w = 0,10 - 0,12$ внаслідок випаровування вільної води;
- значення кінцевої вологості w_k ущільненого суглинку в межах дослідного інтервалу $\rho_d = 1,50 - 1,65 \text{ г/см}^3$ зменшується зі зростанням щільності скелета ґрунту (рис. 5), що пов'язано з тим, що зі збільшенням ρ_d коефіцієнт фільтрації ґрунту знижується, що призводить до зниження швидкості перерозподілу вологості;
- кінцева вологість ґрунту наближається до його, так званої, максимальної молекулярної вологомості w_{mm} (за В.І. Біруля [9] $w_{mm} \approx 0,17$);
- зниження вологості w , при якій ґрунт ущільнювали, в межах дорожнього насипу на практиці призводить до його додаткових осідань.

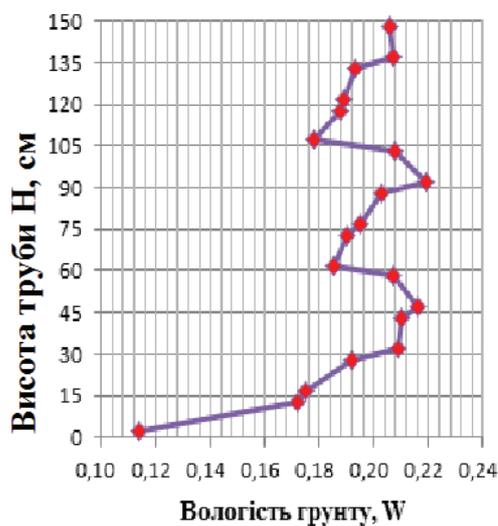


Рис. 4. Залежність вологості ущільненого важкого пілватого суглинку до щільності скелета ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ після 62 діб витримки

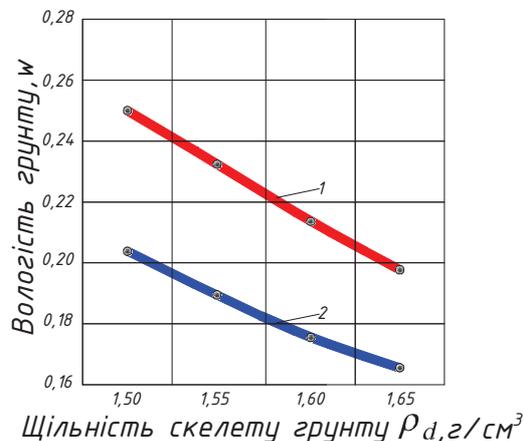


Рис. 5. Графіки залежності вологості ґрунту W , при якій суглинок ущільнювали (1), і середньої кінцевої вологості ґрунту W_k (2) ущільненого суглинку від щільності скелета ґрунту ρ_d в межах висоти труби за винятком її верхньої та нижньої ланок

Висновки. Отже, моделюванням можливої міграції води за товщиною насипу шляхом досліджень змін у часі протягом двох місяців вологості суглинку важкого пилуватого, ущільненого за коефіцієнта водонасичення $S_r = 0,85$ до щільності скелета ґрунту $\rho_d = 1,50 - 1,65$ г/см³ і вміщеного в труби висотою 1,5 м, доведено, що стабілізована величина його вологості наближається до максимальної молекулярної вологомісткості цього ґрунту.

1. Р В.2.3–218–02070915–757:2009. Рекомендації з підвищення стійкості високих насипів автомобільних доріг. – К.: Укравтодор, 2009. – 30 с. 2. ДСТУ Б В.2.1-12: 2009. Зміна №1. ґрунти. Метод лабораторного визначення максимальної щільності. – К.: Мінрегіонбуд, 2011. – 19 с. 3. Кузахметова, Э.К. Методология оценки состояния земляного полотна при реконструкции и ремонте автомобильных дорог в сложных природных условиях. Монография / Э.К. Кузахметова. – Балашиха: ВТУ Спецстроя России, 2010. – 160 с. 4. Инженерная геология. Механика ґрунтів, основи та фундаменти / М.Л. Зоценко та ін. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 568 с. 5. Винников, Ю.Л. Нові критерії оптимального ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови забезпечення їх тривалої міцності / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Проблеми розвитку міського середовища: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2014. – Вип. 1 (11). – С. 424 – 432. 6. Лебедев, А.Ф. Почвенные и ґрунтовые воды / А.Ф. Лебедев. – М.: Сельхозгиз, 1930. – 280 с. 7. Казарновский, В.Д. Основы нормирования и обеспечения требуемой степени уплотнения земляного полотна автомобильных дорог / В.Д. Казарновский и др. – М.: ФГУП «СоюздорНИИ», 2002. – 33 с. 8. Tateyama K. Introduction of Concurrent Engineering to Embankment Construction / K. Tateyama // The Japanese Geotechnical J., 2006. – Vol. 54, No. 9. – P. 30 – 32. 9. Бируля, В.И. Лабораторные работы по ґрунтоведению и механике ґрунтов / В.И. Бируля. – Харьков: ХГУ, 1956. – 124 с.