

УДК 625.72

І.П.Гамеляк, В.В.Петрович, В.Ю.Скрипник
Національний транспортний університет
ВПЛИВ ТЕРМОВОЛОГОПЕРЕНЕСЕННЯ НА ВОДНО-ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ
ДОРОЖНЬОЇ КОНСТРУКЦІЇ

В статті розглянуті методи зменшення впливу термовологоперенесення на водно-тепловий режим ґрунтів активної зони дорожньої конструкції. Наведено результати досліджень регулювання водно-теплого режиму активної зони з урахуванням впливу парогідроізоляційного шару з геокомпозиту.

Подальші дослідження будуть пов'язані з встановленням закономірності надходження води в дренаючі шари з нижньої частини активної зони дорожньої конструкції під впливом постійного навантаження та вдосконаленням конструкції парогідроізоляційного шару.

Ключові слова: термовологоперенесення, водно-тепловий режим, парогідроізоляційний шар, геокомпозит, активна зона дорожньої конструкції

Табл.8. Рис.4. Форм. 4. Літ. 16.

И.П.Гамеляк, В.В. Петрович, В.Ю. Скрипник
ВЛИЯНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОВЛАГОПЕРЕНОСА НА ВОДНО-ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ
ДОРОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ

В статье рассмотрены методы уменьшения влияния тепловлагодпереноса на водно - тепловой режим ґрунта активної зони дорожньої конструкції. Приведены результаты исследований регулирования водно - теплового режима активної зони с учетом влияния парогидроизоляционного слоя с геокомпозита.

Дальнейшие исследования будут связаны с установлением закономерности поступления воды в дренающие слои из нижней части активної зони дорожньої конструкції под воздействием постоянной нагрузки и совершенствованием конструкции парогидроизоляционного слоя.

Ключевые слова: тепловлагодперенос, водно-тепловой режим, парогидроизоляционный слой, геокомпозит, активная зона дорожньої конструкції.

I.Gameliak, V.Petrovich, V. Skrypnyk
INFLUENCE OF MOISTURE THERMAL TRANSFER EFFECT ON WATER-THERMAL
MODE OF ROAD CONSTRUCTION

The article deals with methods of moisture thermal transfer impact reduction on water and soil thermal regime of road construction active zone. It's known that the nature of water and thermal conditions determines by the power of moisture source, the nature of water displacement, rate and duration of roadbed active zone cooling. This article presents the results of water-thermal regime regulation studies of the active zone with the influence of geo-composites vapor and hydro-protective layers.

Object of the study – phenomenon of humid heat transfer in active zone of road construction.

Purpose of the study – study of the moisture heat transfer influence to the water-heat mode of road construction active zone using vapor moisture-insulating layer of geo-composites.

The method of research - experimental studies conducted with the use of specially made installations, fittings and methods of research.

Experimentally proved that geo-composite layers that was placed between the fourth and fifth levels of the soil, contributes to stop the further migration of moisture and drainage of the soil column.

The maximum value of the current humidity observed at a depth of approximately 350 mm of soil column or 1/3 of the road construction active zone depth. Experimental values of the current humidity is much lower compared with the calculated analytically, especially in the roadbed active zone.

The findings of the study and recommendations for further research:

- obtained the regression equation of the water abstracted resulting volume V_d dependence on soil moisture W and temperature gradient $gradT$;

- as a result of experimental verification established the fact of water removal by the areas of geo-composite vapor moisture-insulating layers, while maintaining a constant value of initial moisture on top of the soil column;

- volume of abstracted water by geo-composite layer depends on the initial soil moisture and temperature gradient.

Further studies will be associated with the establishment of water flow patterns in the draining layers from the bottom of the road construction active zone under the constant load influence and improvement of the vapor moisture-insulating layers design.

Key words: Moisture thermal transfer effect, water and thermal mode, vapor moisture-insulating layers, geo-composite, road construction active zone.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними дослідженнями

У період експлуатації автомобільної дороги, внаслідок впливу температури повітря, атмосферних опадів, поверхневих та ґрунтових вод земляне полотно та дорожній одяг знаходяться в відповідному водно-тепловому режимі, від якого залежить міцність ґрунтів в активній зоні та

©І.П.Гамеляк, В.В.Петрович, В.Ю.Скрипник

стійкість земляного полотна, міцність та довговічність конструкції дорожнього одягу. Небезпечний вплив зміни водно-теплового режиму проявляється в зниженні ущільненості ґрунту активної зони, зниженні міцності, появи пучин взимку та просядок навесні, появи тріщин на покритті автомобільної дороги. В цілому це приводить до зниження рівності, міцності дорожніх одягів та, як наслідок, зменшення швидкості руху та продуктивності транспорту.

Характер водно-теплового режиму дорожньої конструкції визначається потужністю джерел зволоження (атмосферні опади, поверхневі та ґрунтові води, водяна пара) та характером переміщення вологи, швидкістю та тривалістю охолодження активної зони земляного полотна. Тому виникає нагальна потреба підвищення стабільності дорожньої конструкції автомобільної дороги протягом року за рахунок спрямованого регулювання її водно-теплового режиму.

Аналізуючи сучасний стан цього питання, слід зазначити теорію перенесення тепла і вологи в земляному полотні, що була покладена в основу створення розрахункових теорій В.М. Сіденка [1], які знайшли своє застосування для характеристик водно-теплового режиму земляного полотна II-IV дорожніх кліматичних зон. Значний внесок у розвиток теорії регулювання водно-теплового режиму земляного полотна внесли роботи І.А. Золотаря, А.Я. Тулаєва [1], Н.А. Пузакова [2], М.Б. Корсунського [3], В.І. Рувинського, Е.І. Шелопаєва, й інших. Метод Н.А. Пузакова донедавна був основою для розрахунку характеристик водно-теплового режиму земляного полотна в районах з сезонним промерзанням ґрунтів. У подальшому отримала теоретичне обґрунтування та практичне застосування фізико-технічна теорія регулювання водно-теплового режиму земляного полотна, яка була розроблена в СоюздорНДІ групою вчених під керівництвом В.І. Рувинського [4] та покладена в основу створення Посібника до СНіП 2.05.02-85 з проектування методів регулювання водно-теплового режиму верхньої частини земляного полотна.

Регулюванню водно-теплового режиму земляного полотна присвячена робота А.І. Ярмолінського [5]. У ній наведено результати досліджень з регулювання водно-теплового режиму земляного полотна з урахуванням впливу купольних ребристих плит; компенсаційних добавок у здимальні ґрунти; гідрофобізованих дисперсних матеріалів і відходів промисловості в теплоізолюючих і гідроізолюючих шарах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій у яких розпочато вирішення даної проблеми. Розвитку методів прогнозування та регулювання водно-теплового режиму глинистих ґрунтів земляного полотна автомобільних доріг, що експлуатуються, присвячена робота С.В. Толстеньова [6]. Він запропонував математичну модель процесу термоградієнтного перенесення вологи з глибинних шарів ґрунту до шару, який промерзає. На основі теорії термодифузійного тепло- і масоперенесення розроблено розрахунковий метод визначення величини зимового висхідного вологоперенесення в ґрунтах, особливістю якого є врахування відведеної теплоти, тепловмісту та вмісту вологи в повітрі пор ґрунту. Чим також запропонована конструкція теплової труби для діагностики та регулювання водно-теплового режиму земляного полотна при глибокому заляганні ґрунтових вод [7].

Гнездиловою С.А. [8] запропонована методика врахування змін стану ґрунту при проектуванні дорожнього одягу. Розроблена математична модель прогнозування модуля пружності земляного полотна з урахуванням впливу кліматичних умов. На підставі експериментальних досліджень встановлені залежності міцності та деформованості глинистих ґрунтів у залежності від відносної вологості.

Явищу термовологоперенесення були присвячені дослідження, проведені в Московському Державному Університеті ім. М.М. Ломоносова [9]. Згідно експериментів, проведених на кафедрі ґрунтознавства та інженерної геології, ґрунт, що мав вихідну рівномірну вологість 15,5%, в результаті термовологоперенесення під дією градієнту температури стає нерівномірно зволеним.

Дослідженню особливостей водно-теплового режиму автомобільних доріг з розробкою рекомендацій щодо його регулювання нафтоґрунтовими шарами присвячена робота Є.В. Пулінець [10]. В результаті дослідної перевірки стану нафтоґрунтових шарів у дорожніх конструкціях було показано їх стабілізуючий вплив на водно-тепловий режим автомобільних доріг: зниження глибини промерзання земляного полотна, зменшення обсягу вологонакопичення, підвищення загального модуля пружності та поліпшення міцностних властивостей у несприятливі періоди експлуатації автомобільних доріг.

Боровиковим В.В. [11] був розроблений метод розрахунку дренажних шарів з текстильним синтетичним матеріалом методом кінцевих елементів, що дозволяє оцінювати ефективність їх використання та вплив на них різноманітних конструктивних параметрів. Також був розроблений метод розрахунку дренажних шарів з урахуванням руху води у капілярній зоні, що дає змогу більш обґрунтовано назначати конструктивні параметри дренажного шару.

©І.П.Гамеляк, В.В.Петрович, В.Ю.Скрипник

Моделюванню динаміки водного режиму дренажного шару аеродромного одягу присвячена робота А.Н. Попова [12]. Автором була розроблена та експериментально підтверджена математична модель руху води в пружно-пластичному середовищі та визначені закономірності надходження води у дренажні шари з верхньої частини земляного полотна під впливом динамічного навантаження. Отримано закономірності надходження вільної води у дренажний шар в залежності від величини залишкового порового тиску та часу його збереження. Розроблено аналітичні залежності величини залишкового порового тиску від величини та часу дії колісного навантаження, конструкції аеродромного одягу, деформаційних властивостей ґрунту.

Зміну водно – теплового режиму в річному циклі з використанням оригінального підходу розглянуто в роботі Носова В.П. та Носова В.В. [13]. Виконано математичне моделювання водно-теплового режиму автомобільних доріг з використанням методу динамічної адаптації.

Особливості водно – теплового режиму аеродромних одягів та покриттів розглянуто в роботі [14].

На сьогоднішній день практично відсутні моделі та методи розрахунку водно – теплового режиму основи та земляного полотна з врахуванням використання сучасних геосинтетичних матеріалів.

Мета роботи. Існуючі методи та запропоновані заходи запобігання зниження міцності ґрунтів у несприятливі періоди експлуатації автомобільних доріг мають ряд недоліків, зокрема не достатньо враховується явище вологотеплоперенесення при високому заляганні ґрунтових вод. Тому виникає нагальна потреба проведення експериментальних досліджень міграції вологи в активній зоні дорожньої конструкції з врахуванням наявності парогідроізоляційного шару з геокомпозиту.

Виклад основних результатів дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Міграція води в промерзаючих ґрунтах відбувається внаслідок впливу різних сил, які визначають переважне значення того чи іншого механізму перенесення вологи. Цитович Н.А. перераховує найголовніші з них:

- 1) сили пружності водяної пари (мають важливе значення в маловологих ґрунтах);
- 2) капілярні сили порової води (є вторинним ефектом дії адсорбційних сил і в процесі міграції води в промерзаючих ґрунтах, не маючи самостійного значення, обумовлюють капілярно-плівковий механізм при досяжній глибині залягання ґрунтових вод, меншої глибини максимального капілярного підняття);
- 3) зовнішній і внутрішній тиск, включаючи вакуум (викликає напірний рух ґрунтових вод, що обумовлює при відповідних умовах значне здимання ґрунтів та морозне здимання);
- 4) осмотичні сили (мають переважне значення і визначають процес міграції лише при значній кількості в поровій воді розчинених речовин);
- 5) сили кристалізації льоду (мають істотне значення в процесі льодовиділення та накопичення льоду біля фронту промерзання, приєднуючи до утворених льодових тіл все нові і нові порції мігруючої води, значно посилюючи процес адсорбційно-плівкового механізму міграції);
- 6) адсорбційні сили органо-мінерального скелету ґрунту та льоду, що виникають під дією вільної поверхневої енергії мінеральних часток, мають першорядне значення для будь-яких промерзаючих дисперсних ґрунтів і залежно від природи обмінних катіонів і капілярних властивостей ґрунту визначають інтенсивність міграції та величину морозного здимання.

Сили міграції тільки тоді викликають рух порової води в промерзаючих ґрунтах, коли порушується рівновага фаз і створюються умови виникнення різних градієнтів вологості, температури, адсорбційно-плівкових, осмотичних та інших тисків і, нарешті, ізобарного потенціалу вільної енергії мінеральних часток.

Тому на підставі визначених факторів та їх впливу на водно-тепловий режим дорожньої конструкції, для проведення експериментальних досліджень у лабораторних умовах на першому етапі було обрано два фактори: початкова вологість ґрунту та градієнт температури.

Інтервали варіювання факторів та їх значення в натуральному масштабі на основному, верхньому та нижньому рівнях вказані в табл. 1.

Таблиця 1

Інтервал варіювання факторів та їх значення в натуральному масштабі

Фактори	Початкова вологість ґрунту, W (%) X ₁	Гradient температури, gradT (°C/м) X ₂
Основний рівень (x _i)	12	13,3 (-2°C÷+6°C)
Інтервал варіювання (Δx _i)	4	6,7
Верхній рівень (x _i =1)	16	20 (-2°C÷+10°C)
Нижній рівень (x _i =-1)	8	6,6 (-2°C÷+2°C)

Для отримання більш повної інформації про досліджувані залежності проведено повний двофакторний експеримент. Симетричний ортогональний композиційний план другого порядку на трьох рівнях (-1; 0; +1) в кодованому та натуральному масштабах наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

План експерименту в кодовому та натуральному масштабах

№ досліду	Порядок реалізації	Кодовий масштаб		Натуральний масштаб	
		x ₁	x ₂	X ₁	X ₂
1	4	-1	-1	8	6,6
2	8	0	-1	12	6,6
3	2	+1	-1	16	6,6
4	6	-1	0	8	13,3
5	9	0	0	12	13,3
6	5	+1	0	16	13,3
7	3	-1	+1	8	20
8	7	0	+1	12	20
9	1	+1	+1	16	20

Для експерименту використовували суглинок легкий пілуватий, темно – сірого кольору, придатний для зведення земляного полотна. При завантаженні контейнера ґрунтом згідно з ДСТУ Б.В.2.1-8:2001 [15] відбиралася проба для визначення початкової вологості, щільності, пористості, водопроникності (коефіцієнту фільтрації). (табл. 3).

Таблиця 3

Фізико-механічні характеристики суглинку легкого пілуватого

Фізико-механічні характеристики	Показник
Щільність у природному стані	$\rho = 1,81 \text{ г/см}^3$
Щільність сухого ґрунту	$\rho_d = 1,41 \text{ г/см}^3$
Щільність частинок ґрунту	$\rho_s = 2,68 \text{ г/см}^3$
Коефіцієнт пористості	$e = 0,910$
Коефіцієнт щільності	0,93
Коефіцієнт ущільнення	1,1 (при 0,98)
Коефіцієнт фільтрації	0,0146 м/добу
Границя текучості, W _L , %	28,05
Границя розкочування, W _P , %	21,01
числом пластичності, J _P , %	7,04

Перед початком експерименту ґрунт, ретельно перемішувався з додаванням розрахованої кількості води з метою отримання заданої початкової вологості за планом експерименту. Потім ґрунт завантажувався в поліетиленові пакети вагою по 4 кг та зберігався в додатковій холодильній камері, де його температура доводилася до +1°C. До такої ж температури охолоджувалася в основному холодильнику конструкція стенду.

Для проведення лабораторних експериментальних досліджень щодо визначення здатності парогідроізоляційного шару з геокомпозиту до дренажування та відведення води з активної зони

дорожньої конструкції під дією капілярних сил і тепловологопереносу було створено спеціальну установку в науково-дослідній лабораторії ґрунтознавства та механіки ґрунтів Автомобільно-дорожнього інституту Донецького національного технічного університету.

Установка складається з холодильної камери, в яку поміщено контейнер з підготовленим ґрунтом. Для інтенсифікації спільного теплообміну у випарник холодильної камери встановлений вентилятор. Розміри контейнера в плані 180×180 мм і висотою 600 мм.

Контейнер виготовлено з деревинно-стружкової плити, теплоізолювано пінопластовими плитами товщиною 50 мм та змонтовано на металевому каркасі. Верхня поверхня ґрунту не теплоізолювана та контактує з повітрям.

Температура повітря в холодильній камері над поверхнею ґрунту підтримується автоматично постійною $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ за допомогою регулятора температури холодильної камери.

Контроль і підтримка заданої температури нижнього шару ґрунту у відповідності з планом експерименту здійснюється автоматично за допомогою терморегулятора.

Зміна температури ґрунту по висоті контролюється шістьма термометрами марки ТРМ-10А з термодатчиками ТД1÷ТД6, показання яких відображається на цифрових екранах, рівномірно встановленими по вертикальній осі ґрунтової колонки. Тарування датчиків виконувалась згідно вимог ДСТУ 2858-94.

Для підтримки заданої вологості нижнього шару ґрунту на дно контейнера засипався шар крупнозернистого кварцового піску товщиною 30 мм. Пісок відділявся від ґрунту фільтраційним прошарком. Контроль та підтримка заданої вологості піщаного шару здійснювалась за допомогою крапельного підживлення через голки, які з'єднані за допомогою поліхлорвінілових трубок з ємністю, що заповнена водою. Попередніми експериментами встановлено, що для підтримки постійної вологості необхідно через кожні 12 годин виконувати подачу води в кількості 50 см^3 .

У верхній частині ґрунтової колонки під кутом 15° закладався геосинтетичний шар (з геокмпозиту), який через проріз в передній панелі контейнера виходив в лоток.

Дренажні геокмпозити - високоефективна і економічна альтернатива традиційним дренажним системам із щебеню та інших зернистих матеріалів. В табл. 4 наведено порівняння деяких – видів сучасних геоматеріалів для дренажу. Характеристики різних марок геокмпозиту наведено в табл. 5.

Вода, що дренивала по геосинтетичному шару, збиралася в лоток та по поліхлорвініловій трубці виходила у мірну ємність, яка розташована в основі стенду.

Проведення експерименту здійснювалося наступним чином. В контейнер експериментальної установки пошарово закладався ґрунт й виконувалося його ущільнення через 50 мм до потрібної щільності за допомогою приладу СоюздорНДІ. У той же час на відповідних глибинах (100мм; 200мм; 300мм; 400мм; 500мм) встановлювались термодатчики. При досягненні висоти ґрунту у 400 мм, закладався геосинтетичний шар під кутом 15° . Після цього, знов засипався й ущільнювався ґрунт до повної засипки контейнера, що переміщувався до холодильної камери, всередині якої вже було дотримано необхідну температуру. За допомогою терморегулятора витримувалась необхідна температура нижньої частини установки. За допомогою термодатчиків проводився постійний контроль температур по всій висоті ґрунтової колонки.

Таблиця 4.

Порівняння сучасних геоматеріалів для дренажу

Назва (виробник)	Зовнішній вигляд	Коротка характеристика
Дренажний композит Enkadrain® (фірма Bonar GmbH @ Co.KG, Німеччина)		Складається із жорсткого ядра заключеного між двома шарами геосинтетичного матеріалу

Дренажний композит «Славрос - дренаж» (Славрос, Росія)		Складається із об'ємної геосітки і прикріпленого з 2-х сторін фільтруючого нетканого матеріалу.
Двохшаровий рулонний матеріал, який ISO-DRAIN 8 Geo (INTERPLAST, Німеччина)		Складається з шиповидної геомембрани HDPE і фільтруючого шару з поліпропіленового термічно скріпленого геотекстилю Турар® SF32, з'єднаних між собою на заводі-виробнику

Таблиця 5

Характеристики полімерного геокомпозиту, дренажного мату що має з однієї сторони нетканый фільтр, а з другої гідроізоляційний шар.

Властивості	Од. вим.	Дані	Властивості	Од. вим.	Дані
Товщина при навантаженні, не менше 2 кПа 20 кПа 200 кПа	мм мм мм	6,5 4,7 4,0	Максимальне зусилля на розтягнення, не менше вздовж волокон поперек волокон	кН/м кН/м	18 16
Коефіцієнт фільтрації поперек композиту при навантаженні, не менше 2 кПа 20 кПа 200 кПа	м/доб. м/доб. м/доб.	50 35 30	Розмір рулону довжина ширина	м м	30 2
Коефіцієнт фільтрації по площині композиту при навантаженні, не менше 2 кПа 20 кПа 200 кПа	м/доб. м/доб. м/доб.	550 500 390	Вага рулону	кг	45

Зміна вологості ґрунту по висоті контролювалася періодичним відбором проб ґрунту через отвори діаметром 15 мм, які розташовані на передній панелі, герметично закриті пробками та наступним висушуванням їх до постійної маси. Вологість відібраних проб ґрунту визначалася згідно ДСТУ Б.В.2.1-17:2009 [16].

Відбір проб ґрунту для визначення поточної вологості та вимірювання кількості дренажної води проводилося через кожні 24 години після початку експерименту.

Результати експерименту із закладанням шару геокомпозиту, середні значення по кожному експерименту та середні квадратичні відхилення S^2 наведено в табл. 6.

Таблиця 6

Об'єм води відведеної парогідроізоляційним шаром з геокомпозиту

Номер експерименту	Номер дубля	Об'єм відведеної води, см ³	\bar{y}	S^2_y
1	2	3	4	5
1	1	10,5	10,5	0,025

	2	10,7		
	3	10,4		
2	1	11,6	11,8	0,025
	2	11,7		
	3	11,8		
3	1	15,7	15,5	0,04
	2	15,5		
	3	15,3		
4	1	12,4	12,0	0,13
	2	11,9		
	3	11,7		
5	1	13,2	13,1	0,005
	2	13,1		
	3	13,1		
6	1	17,0	17,2	0,045
	2	17,4		
	3	17,1		
7	1	16,2	16,2	0,005
	2	16,2		
	3	16,3		
8	1	17,5	17,9	0,125
	2	17,9		
	3	18,2		
9	1	23,6	23,8	0,04
	2	23,8		
	3	24,0		

У процесі обробки результатів експериментальних даних на першому етапі перевірили однорідність ряду порядкових дисперсій за критерієм Кохрена.

$$G^{расч} < G^{табл}, \quad (1)$$

$$0,296 < 0,478.$$

Умова виконується, тому ряд дисперсій можна вважати однорідним.

Для розрахунку коефіцієнтів регресії цієї моделі приведена розширена матриця планування й результатів експериментів (табл. 7).

Таблиця 7

Розширена матриця планування й результатів експериментів

№ експерименту	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	$x_i^1 = x_i^2 - \lambda_2$	$x_i^2 = x_i^1 - \lambda_2$	y (V)	Примітка
1	+1	+1	+1	+1	0,33	0,33	23,80	Повний факторний експеримент 2^2
2	+1	+1	-1	-1	0,33	0,33	16,20	
3	+1	-1	+1	-1	0,33	0,33	15,50	
4	+1	-1	-1	+1	0,33	0,33	10,50	
5	+1	+1	0	0	0,33	-0,67	17,20	Зіркові точки
6	+1	-1	0	0	0,33	-0,67	12,00	
7	+1	0	+1	0	-0,67	0,33	17,90	
8	+1	0	-1	0	-0,67	0,33	11,80	
9	+1	0	0	0	-0,67	-0,67	13,10	Центр плану

Після цього за результатами всіх дев'яти експериментів розширеної матриці планування, були розраховані коефіцієнти регресії. Дисперсія оцінок коефіцієнтів склала 0,003. Відповідно середньоквадратична похибка дорівнювала $S_{b_i} = 0,0522$.

Для рівня значущості $\alpha = 0,05$ та при числі ступенів свободи $f_1 = 18$ отримали табличне значення t -критерію $t_{0,05;18} = 2,10$ та розрахували довірчий інтервал коефіцієнтів регресії, який дорівнює 0,11.

Порівняння абсолютних значень з їх довірчими інтервалами показало, що статистично значущими є усі коефіцієнти отриманої моделі.

Отже, рівняння регресії має вигляд

$$y = 15,33 + 2,97 \cdot x_1 + 3,35 \cdot x_2 + 0,65 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,37 \cdot x_1^2 + 1,62 \cdot x_2^2, \quad (2)$$

де у відповідності з умовами даного експерименту (табл. 5) кодовані (x_i) та натуральні (X_i) значення факторів зв'язані співвідношеннями

$$x_1 = \frac{X_1 - 12}{4}, \quad x_2 = \frac{X_2 - 13,3}{6,7}.$$

Таким чином у натуральному масштабі рівняння регресії має вигляд

$$Y = 22,35 - 1,63X_1 - 0,75X_2 + 0,024X_1X_2 + 0,086X_1^2 + 0,036X_2^2, \quad (3)$$

Підраховані таким чином значення результуючого об'єму відведеної води наведено у табл. 5. Дані цієї ж таблиці використані для визначення дисперсії неадекватності.

Таблиця 8

Зіставлення експериментальних та розрахованих даних

Номер експерименту	X_1	X_2	$Y (V^{\text{експер}})$	$Y (V^{\text{розрах}})$	$ \Delta y $	Δy^2
1	8	6,6	10,5	12,66	2,16	4,67
2	12	6,6	11,8	13,60	1,80	3,24
3	16	6,6	15,5	17,29	1,79	3,20
4	8	13,3	12,0	13,74	1,74	3,03
5	12	13,3	13,1	15,33	2,23	4,97
6	16	13,3	17,2	19,67	2,47	6,10
7	8	20	16,2	18,06	1,86	3,46
8	12	20	17,9	20,30	2,40	5,76
9	16	20	23,8	25,29	1,49	2,22
Σ						31,65

Перевірку адекватності моделі було проведено за критерієм Фішера.

Гіпотезу про адекватність рівняння приймаємо у тому разі, коли розраховане значення F – критерію не перевищує табличного для обраного рівня значимості, тобто коли: у нашому випадку, при 5%-ому рівні значимості: $3,245 < 3,285$.

Отже гіпотеза про адекватність отриманого рівняння регресії не відкидається.

Графік інтерполюючої залежності результуючого об'єму відведеної води V_d від варійованих факторів впливу (рис. 1) побудовано у програмі КОМПАС-3D V13 за даними табл. 6 колонки $Y (V^{\text{розрах}})$.

Для кращої наочності зображення на графіку напрямки осей були дещо змінені, а також у площинах $0Wz$, $0V_d$ та 0gradT було побудовано пунктирну сітку, об'єм відведеної води з площі геокомпозиту в дослідній установці перераховано до одиниці виміру, що частіше використовується – л/м².

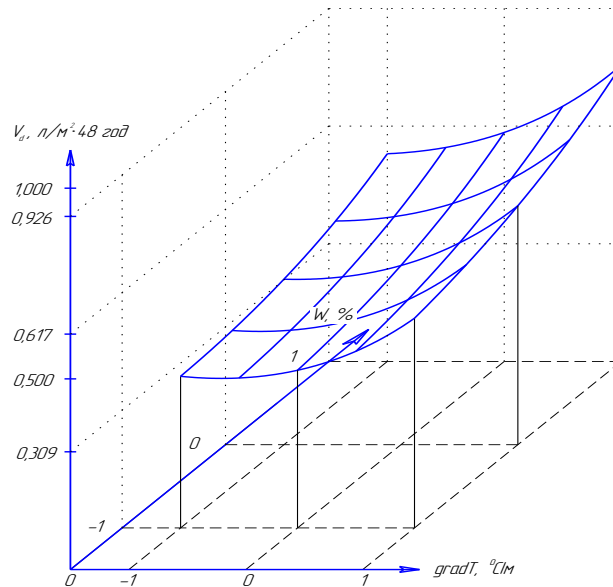


Рис. 1. Графік інтерполюючої залежності результуючого об'єму відведеної води V_d від варійованих факторів впливу

На рис. 2 наведено динаміку зміни температури при різних градієнтах температури. Початкова температура ґрунту складала $+1^\circ\text{C}$, згідно до методики експерименту. Для кожного градієнту наведено температури станом на 6-у та 24-у годину. У процесі проведених експериментів виявлено, що в подальшому зміну температури по висоті ґрунтової колонки не відбувалось.

Задача про зміну температури при різному градієнті температур зводиться до розрахунку середньої інтегральної температури однорідного напівпростору тіла при граничних умовах першого роду.

Аналітичний вираз цієї задачі має такий вигляд:

$$t(z) = t_n + (t_{gp} - t_n) \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^u e^{-u^2} du, \quad (4)$$

t_{gp} – початкова температура ґрунту, $^\circ\text{C}$;
 t_n – температура поверхні, $^\circ\text{C}$;

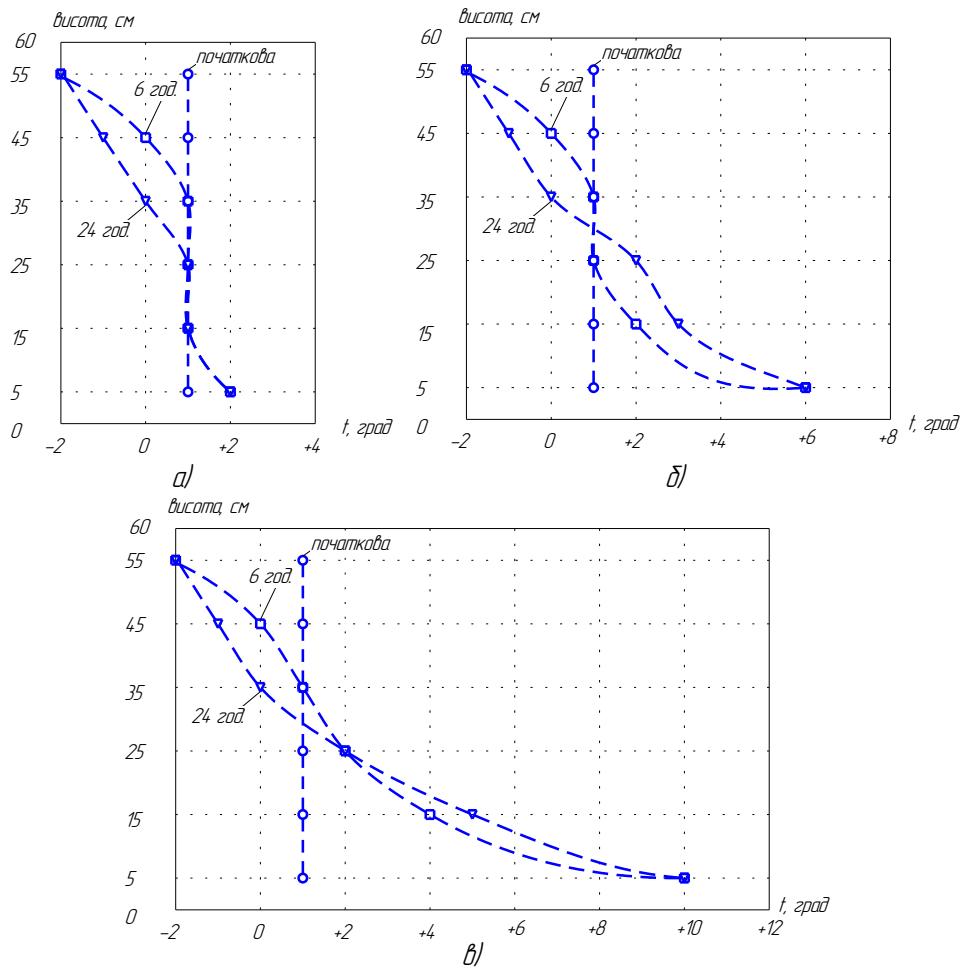
$$u = \frac{z}{2\sqrt{a \cdot \tau}};$$

z – відстань від поверхні до точки, де визначається температура;
 a – температуропровідність ґрунту, $\text{в}=0,00174$ ккал/год;
 τ – час, протягом якого діє температура t_n .

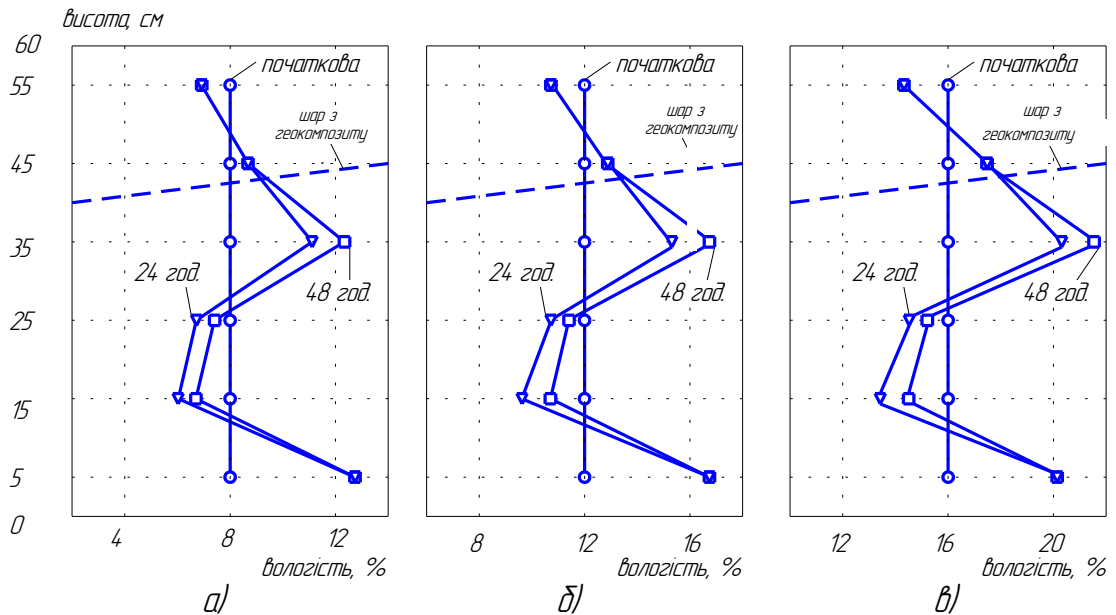
Результати динаміки зміни вологості у часі при градієнті $13,3^\circ\text{C}/\text{м}$ наведено на рис. 3.

Згідно таблиці Д.7 ВБН В.2.3-218-186-2004 розрахункові значення характеристик ґрунтів для суглинку легкого пилуватого, що характеризується числом пластичності, J_p від 7 до 12 апроксимуються степеневою залежністю від зміни відносної вологості, яка має вид для:

- модуля пружності, МПа $E_{gp} = 18,286 \cdot (W/W_L)^{-2,756}$;
- кута внутрішнього тертя, град $\phi = 11,054 \cdot (W/W_L)^{-1,452}$;
- питомого зчеплення ґрунту, МПа $C = 0,0041 \cdot (W/W_L)^{-3,437}$.



а) градієнт $6,7 \text{ }^\circ\text{C/m}$; б) градієнт $13,3 \text{ }^\circ\text{C/m}$; в) градієнт $20 \text{ }^\circ\text{C/m}$
 Рис. 2. Динаміка зміни температури при різному градієнті температур



а) початкова вологість 8% ; б) початкова вологість 12% ; в) початкова вологість 16%
 Рис. 3. Динаміка зміни вологості при постійному градієнті температур

Отримані результати показують, що епюри зміни вологості по висоті ґрунтової колонки для різних початкових умов вельми схожі. На першому рівні відбору проб спостерігалось збільшення вологості за рахунок порційного підживлення водою підстилаючого шару піску.

На другому та третьому рівні відбувалося незначне пониження вологості. На четвертому рівні, за рахунок тепловологопереносу та капілярного підняття, відбулося значне збільшення вологості. Таким чином експериментально доведено, що геокомпозитний шар, який було розміщено між четвертим та п'ятим рівнем, сприяв припиненню подальшої міграції вологи та дренажуванню її з ґрунтової колонки.

Максимальні значення поточної вологості спостерігаються приблизно на висоті 350 мм ґрунтової колонки або на 1/3 глибини активної зони дорожньої конструкції. Експериментальні значення поточної вологості значно нижчі, порівняно з розрахованими аналітичним шляхом, особливо в активній зоні земляного полотна.

На рис. 4 наведено зміну розрахункових характеристик ґрунту по висоті з врахуванням зміни відносної вологості.

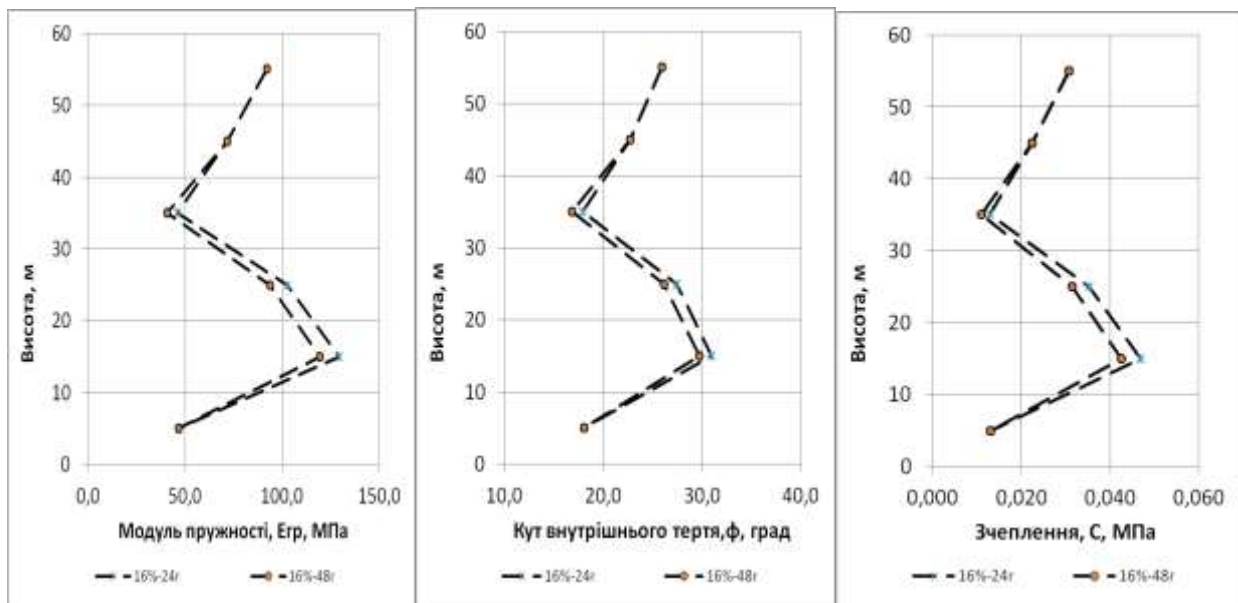


Рис. 4. Зміна розрахункових характеристик ґрунту по висоті

Аналіз рис. 4 показує, що при застосуванні геосинтетичного дренажного композиту за рахунок зменшення відносної вологості на 0,16 - 0,19 розрахункові характеристики ґрунту значно зростають. Так модуль пружності через 24 та 48 год. максимально зростає в 2,0 та 2,3 рази, кут внутрішнього тертя, в 1,45 та 1,54 раз, питоме зчеплення в 2,4 - 2,8 раз. Все це позитивно повинно вплинути на несучу здатність, довговічність та надійність конструкцій дорожнього одягу.

Висновки: На підставі виконаних експериментальних досліджень отримані наступні результати:

- отримано рівняння регресії залежності результуючого об'єму відведеної води V_d , від вологості ґрунту W та градієнту температури $gradT$;
- у результаті дослідної перевірки, встановлений факт відведення води по площі паро гідроізоляційного шару з геокомпозиту, при збереженні постійного значення початкової вологості у верхній частині ґрунтової колонки;
- об'єм відведеної шаром геокомпозиту води залежить від початкової вологості ґрунту та градієнту температури.

Подальші дослідження будуть пов'язані з встановленням закономірності надходження води в дренажні шари з нижньої частини активної зони дорожньої конструкції під впливом постійного навантаження та вдосконаленням конструкції паро гідроізоляційного шару.

1. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / [Золотарь И. А., Пузаков Н. А., Сиденко В. М. и др.] ; под. ред. И. А. Золотаря. – М. : Изд-во «Транспорт», 1971. – 416 с.
2. Пузаков Н. А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог/ Пузаков Н. А. – М. : Автотрансиздат, 1960. – 190 с.
3. Корсунский М. Б. Прогнозирование расчетной влажности грунтов земляного полотна/ М. Б. Корсунский, П.Д. Россовский // Труды Союздорнии. – 1975 – Вып. 76. – С. 5-29
4. Рувинский В. И. Оптимальные конструкции земляного полотна / В. И. Рувинский. – М. : Транспорт, 1962. – 166 с.
5. Ярмолинский А. И. Исследование водно-теплого режима автомобильных дорог в условиях муссонного климата : автореф. дис. докт. техн. наук : спец 05.23.11 «Строительство автомобильных дорог и аэродромов» / А. И. Ярмолинский. – Москва, 1995. – 18 с.
6. Толстенов С. В. Развитие методов прогнозирования и регулирования водно-теплого режима земляного полотна эксплуатируемых автомобильных дорог (на примере Алтайского края) : автореф. дис. канд. техн. наук : спец 05.23.11 «Строительство автомобильных дорог и аэродромов» / С. В. Толстенов. – Омск, 2002. – 17 с.
7. Пат. 2184328 Российская Федерация, МПК F 28 D 15/02. Способ работы термосифона / В. В. Евстигнеев (RU). - № 2000120101/06-03 ; заявл. 27.07.2000 ; опубл. 27.06.2002
8. Гнездилова С. А. Учет изменения состояния грунтов при проектировании дорожных одежд : автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец 05.23.11 «Строительство автомобильных дорог и аэродромов» / С. А. Гнездилова. – Москва, 2010. – 22 с.
9. Королев В. А. Термодинамика грунтов / Королев В. А. – М. : Изд-во МГУ, 1997. – 168 с.
10. Пулинец Е. В. Исследование особенностей водно-теплого режима автомобильных дорог Сахалинской области с разработкой рекомендаций по его регулированию нефтегрунтовыми слоями : автореф. дис. докт. техн. наук : спец 05.23.11 «Строительство автомобильных дорог и аэродромов» / Е. В. Пулинец. – Москва, 2002. – 11 с.
11. Боровиков В. В. Повышение эффективности осушения дорожных одежд и верхней части земляного полотна : автореф. дис. канд. техн. наук : спец 05.22.03 «Изыскание и проектирование железных дорог и автомобильных дорог» / В. В. Боровиков. – Москва, 1984. – 21 с.
12. Попов А. Н. Моделирование динамики водного режима дренирующего слоя аэродромной одежды : автореф. дис. канд. техн. наук : спец 05.23.11 «Строительство автомобильных дорог и аэродромов» / А. Н. Попов. – Москва, 2002. – 18 с.
13. Носов В.П., Носов В.В. Математичне моделювання теплового-водно-теплого режиму автомобільних доріг з використанням методу динамічної адаптації. Транспорт: наука, техн, упр, Збірник оглядової інформації, М.: ВИНТИ, №3, 1977. - С. 18 - 31.
14. Кульчицкий В.А. Макагонов В.А., Васильев Н. Б., Чеков А.Н., Романков Н.И. Аэродромные покрытия. Современный взгляд. - М.: Физико- математическая литература, 2002. - 528 с.
15. ДСТУ Б В.2.1-8:2001. Грунти. Відбирання, упакування, транспортування й зберігання зразків.– К. : Мінрегіонбуд України, 2002. – 35 с.
16. ДСТУ Б В.2.1-17:2009. Грунти. Методи лабораторного вивчення фізичних властивостей .– К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 32 с.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2014