https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.201

УДК 625.7/.8

Славінська О. С., *д-р техн. наук, проф.*, *http://orcid.org/0000-0002-9709-0078*
Бубела А. В., *канд. техн. наук, доц.*, *http://orcid.org/0000-0002-5619-003X*
Бондаренко Л. П., *канд. техн. наук, доц.*, *http://orcid.org/0000-0002-8239-065X*
Чечуга О. С., *канд. техн. наук, доц.*, *http://orcid.org/0000-0003-1643-6354*

Національний транспортний університет, м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ДРЕНАЖІВ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ ЗА ІНТЕНСИВНІСТЮ ВОДОВІДВЕДЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЇ

Анотація

Вступ. Суттєвим наслідком недостатнього водовідведення та перезволоження дорожньої конструкції є зниження її міцності та несної здатності внаслідок зменшення модуля пружності ґрунтів земляного та шарів основи дорожнього одягу. Не завжди ефективні спроби герметизації дорожнього покриття, погіршення його транспортно-експлуатаційного стану в процесі експлуатації не можуть забезпечити зменшення інтенсивності проникнення води в дорожню конструкцію. Це потребує влаштування особливо на перезволожених ділянках доріг дренажних конструкцій мілкого закладання.

Проблематика. Дренажі мілкого закладання влаштовують в робочі зоні земляного полотна, вони є підземними спорудами, що унеможливлює проводити спостереження за режимом їх роботи. Наведений в роботі аналіз досліджень обумовлює необхідність визначення ефективності роботи дренажних конструкцій мілкого закладання, як за інтенсивністю водовідведення, так і під впливом вібраційної дії транспортних засобів. Єдиним шляхом вирішення цієї актуальної проблеми є проведення експериментальних досліджень на великомасштабних моделях, що максимально відповідають натурним умовам.

Мета. Метою даної роботи є дослідження режиму роботи поперечних ДМЗ (ПДМЗ) за інтенсивністю водовідведення з урахуванням впливу вібрації на лабораторній установці дорожньої конструкції.

Матеріали та методи. В навчально-науковій лабораторії кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету на експериментальні установці дорожньої конструкції було проведено серію досліджень роботи двох типів дренажних конструкцій мілкого закладання, з трубчастою дреною, обсипаною крупнозернистим піском та з щебеневим ядром. Параметри установки відповідають III та IV категорії автомобільної дороги. Відповідно до проведених натурних вимірювань показників вібрації, було спроєктовано та побудовано установку імітації вібрації від дії транспортних засобів. Експерименти проводилися, як з вібраційним впливом від транспортних засобів, так і без нього. Установка дорожньої конструкції оснащена системою імітації дощових опадів, яка працювала в режимі інтенсивності дощових опадів 5 %.

Результати. Під час досліджень визначено режими формування водного потоку та виміряно інтенсивність водовідведення дренажної траншеї з трубчастою дреною та дренажної траншеї зі щебеневим ядром. За результатами вимірів проаналізовано вплив вібрації від дії транспортних засобів на два типи дренажних конструкцій та отримано кореляційно-регресійні залежності для визначення їх інтенсивності водовідведення залежно від початкової вологості земляного полотна.

Висновки. Згідно з результатами експериментальних досліджень конструкція дренажу

мілкого закладання з щебеневим ядром відводить більшу кількість води в середньому на 10 % без впливу вібрації, та на 14 % більше під впливом вібрації, за часом, відповідно, в 7 та 11 разів швидше, ніж конструкція з трубчастою дреною. Це підтверджує її більш високу ефективність роботи. При порівнянні відповідних типів дренажних конструкцій між собою без дії вібрації та з нею, можна дійти висновку, що на інтенсивність водовідведення конструкції з трубчастою дреною вібрація майже не впливає

Ключові слова: вібрація, дорожня конструкція, дренаж мілкого закладання, дренуючий шар, дренажна труба, щебеневе ядро.

Вступ

Дорожні конструкції з покриттями, переважно влаштованими на основі органічних в'яжучих, зазнають суттєвих тепловологісних впливів, що посилюються не тільки за рахунок природного старіння в'яжучого, наявністю тріщин і вибоїн, а також від постійної вібраційної дії транспортних засобів. З метою запобігання накопиченню вологи у шарах основи дорожнього одягу, у робочій зоні земляного полотна та, відповідної, втрати несної здатності влаштовують дренажі мілкого закладання (ДМЗ). ДМЗ — це підземні споруди і дослідити режим їх роботи складно. Єдиним шляхом вирішення цієї актуальної проблеми є проведення експериментальних досліджень на великомасштабних моделях, що максимально відповідають натурним умовам. Питання щодо дослідження режимів роботи дорожньої конструкції та визначення параметрів елементів дренажних систем мілкого закладення носять розрізнений характер.

Вплив води на дорожню конструкцію з точки зору проникності шарів дорожнього одягу, роботи дренажних систем та екологічних питань досліджено в роботі [1]. Поглинання води залежить, як від інтенсивності опадів, так і від експлуатаційного стану дорожнього покриття, узбіч та дренажу мілкого закладання. З метою отримання фундаментального розуміння шкідливого впливу води на асфальтобетонне покриття автор [1] розглядає ці процеси в мікромасштабі. Але в роботі не враховується вплив інфільтруючої вологи на шари основи дорожнього одягу та інтенсивність виведення її дренажною системою.

Вплив статичної понаднормової ваги транспортних засобів на напружено-деформований стан дорожньої конструкції та, зокрема, конструктивних елементів трубчастих поперечних ДМЗ розглянуто в роботі [2]. Проте лишилось відкритим питання вібраційного впливу на роботу дренажної конструкції.

У роботі [3] запропоновано дослідження вібраційних властивостей ґрунтів, на основі яких визначено ефект зниження поглинання хвиль вібрації в ґрунті земляного полотна зі збільшенням його щільності. Оцінка впливу динамічного навантаження від транспортних засобів (ТЗ) на дорожнє покриття на основі дослідження генерації вібрації, що викликана нерівностями його поверхні наведена в роботі [4]. Наведені числові результати показали, що генерація вібрації принципово залежить від поздовжньої нерівності дорожнього покриття і значно меншою мірою від збільшення швидкості руху ТЗ. Але питання, як впливає вібрація на загальний стан дорожньої конструкції з дренажем мілкого закладання авторами [3, 4] була розглянута.

Вище наведений аналіз досліджень обумовлює нову, актуальну наукову проблему з визначення ефективності роботи дренажних конструкцій мілкого закладання, як за інтенсивністю водовідведення, так і під впливом вібраційної дії транспортних засобів.

Метою даної роботи є дослідження режиму роботи поперечних дренажів мілкого закладання (ПДМЗ) за інтенсивністю водовідведення з урахуванням впливу вібрації.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

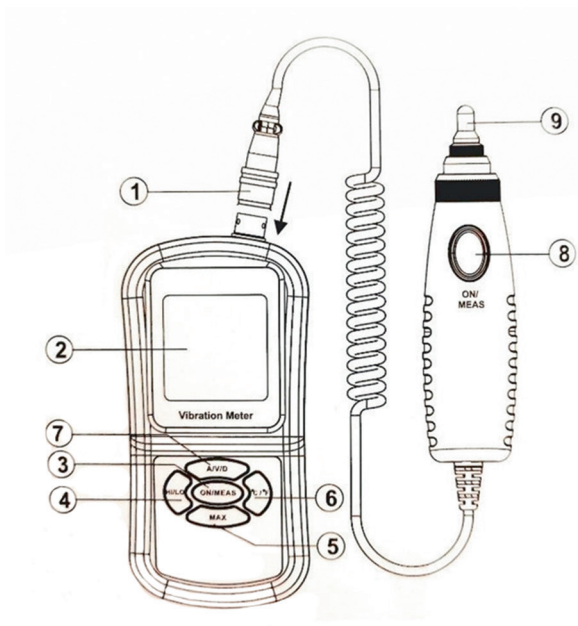
– проведення моделювання впливу вібрації на дорожню конструкцію на основі параметра віброперемiщення, який відповідає дії від транспортних засобів;

– проведення дослідження двох типів конструкцій ПДМЗ за інтенсивністю водовідведення з вібраційним впливом та без нього;

– побудувані та досліджені кореляційно-регресійні залежності для визначення інтенсивності водовідведення кожного типу конструкції ПДМЗ.

Основна частина

Для моделювання впливу вібрації від дії транспортних засобів на дорожню конструкцію було здійснено виїзд на вулицю Богатирську м. Київ (за сприянням Оболонського ШЕУ). Вимірювання показників впливу вібрації на дорожню конструкцію проводилися приладом GM-63B з виносним датчиком, який дозволяє проводити вимірювання від впливу всіх видів вібруючих механічних споруд за такими величинами як прискорення (м/с^2), швидкість (м·с) та переміщення (мм) (рис. 1).

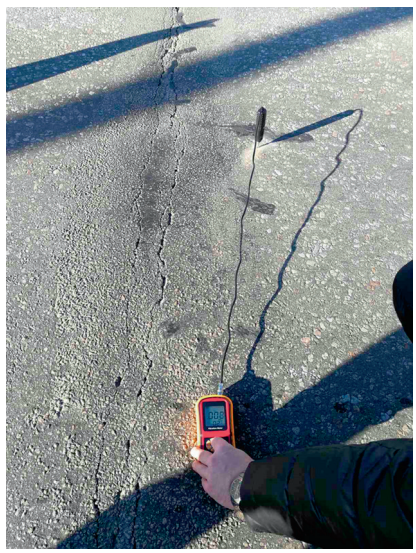


1 — роз’єм ручки (з напрямком); 2 — дисплей; 3, 8 — кнопка включення; 4 — кнопка вибору частоти; 5 — кнопка фіксації максимального значення; 6 — кнопка вибору одиниці вимірювання температури; 7 — кнопка вибору режиму вимірювання (прискорення / швидкість / переміщення); 9 — наконечник детектора

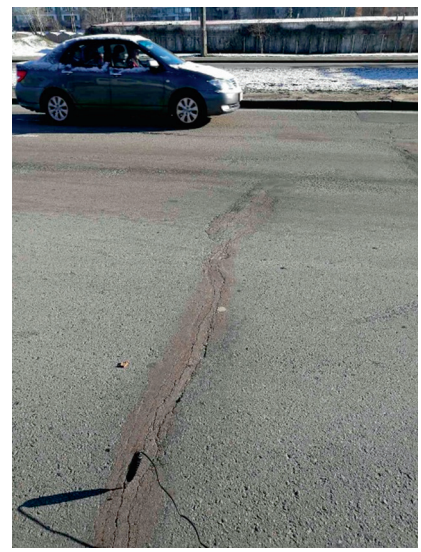
Рисунок 1 — Схема приладу GM-63B з виносним датчиком

Замір проводили на проїзній частині на відстані одного метру від смуги накату. Для забезпечення точності вимірювань у покритті робили отвори діаметром 6 мм та глибиною 40 мм. В отвори монтували виносний провідний датчик (рис. 2 *а*).

Стан покриття на даній ділянці був задовільний: незначна колійність, відсутні вибоїни, незначні поперечні тріщини. За допомогою приладу проводили виміри від впливу легкових та вантажних ТЗ. При русі легкових ТЗ з масою до 2 тонн зі швидкістю 60 км/год вібропереміщення складало від 0 мм до 0,001 мм. При русі вантажних ТЗ з масою більше 20 тонн і кількістю осей 6 зі швидкістю 60 км/год — від 0,002 мм до 0,004 мм.



а)



б)

Рисунок 2 — Вимірювання показників вібрації приладом GM-63B по вул. Богатирській м. Київ: *а)* на ділянці № 1; *б)* на ділянці № 2

Наступна ділянка вимірювання знаходилася на тій же вулиці, але були деякі відмінності у стані покриття: окрім колійності та тріщин на покритті були вибоїни. Для заміру вібропереміщення використовувалися поперечні тріщини в покритті (рис. 2 *б*).

У результаті було визначено, що при русі легкових ТЗ з масою до 2 тон зі швидкістю 60 км/год вібропереміщення складало від 0,001 мм до 0,003 мм; при русі вантажних ТЗ з масою більше 20 тонн та кількістю вісей 6 зі швидкістю 60 км/год — від 0,004 мм до 0,018 мм. Погодні умови при проведенні всіх вимірювань були однакові, температура повітря — (3–4) ºС.

Відповідно до проведених натурних вимірювань показників вібрації, було спроєктовано та побудовано установку імітації вібрації (УІВ) від дії ТЗ.

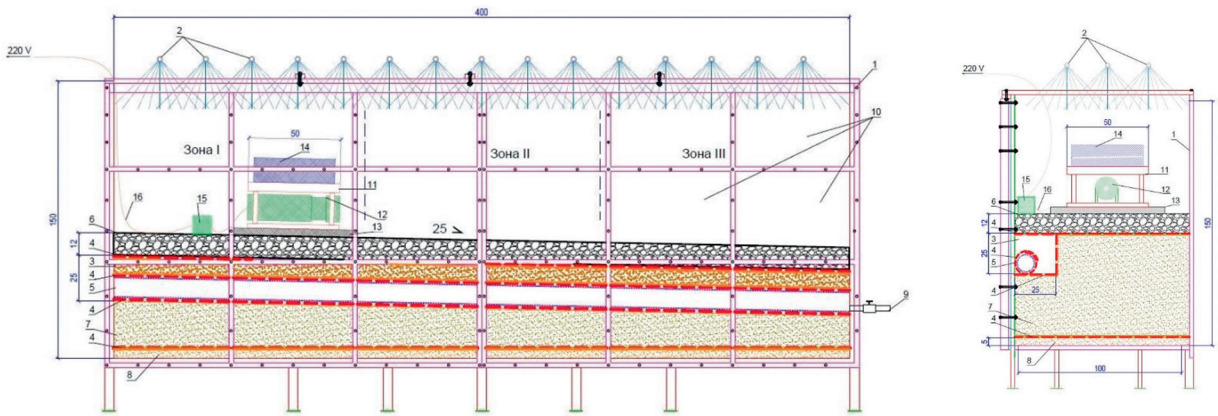
УІВ складається з гумової платформи товщиною 35 мм, металевого листа розміром 500 мм × 500 мм × 3 мм, металевого каркаса з піддоном для розміщення додаткового навантаження, електродвигуна потужністю 1,5 кВт, реостату для регулювання обертів двигуна. Вага УІВ складає 53 кг.

УІВ дозволяє відтворювати ті діапазони параметрів вібрації, які відповідають реальним характеристикам сучасних ТЗ. Для додаткового навантаження використовували мішки з піском. Для імітації вібрації від дії легкових ТЗ додаткове навантаження не використовувалося, а для великовагових ТЗ — складало 25 кг. При збільшенні додаткового навантаження параметри вібропереміщення майже не змінювалися.

У навчально-науковій лабораторії кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету спроєктована та побудована

експериментальна установка, яка моделює дорожню конструкцію в натуральну величину. Розміри установки дозволяють влаштувати один метр погонної довжини дорожньої конструкції з ПДМЗ (половину в поперечному профілі дороги III–IV категорій). Параметри установки наведені на рис. 3 і рис. 4.

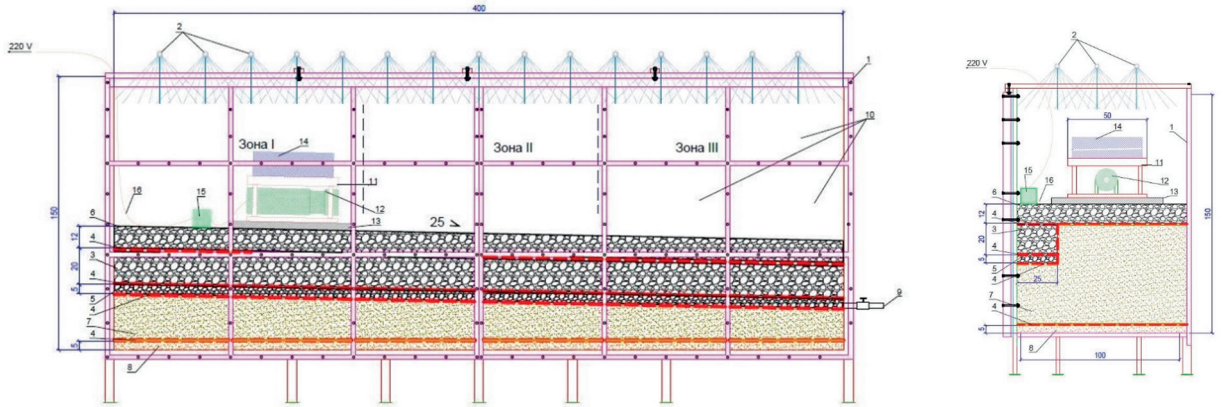
В установці влаштовано робочий шар земляного полотна (ЗП) загальною глибиною 55 см (ґрунт — суглинок легкий). Перед проведенням кожного дослідження виконували вимірювання вологості ґрунту ЗП. Для можливості спостерігання за всіма процесами, які відбуваються в дорожній конструкції, передня фронтальна стінка зроблена з прозорого оргскла. Вздовж стінки у ЗП влаштовано траншею розмірами 25 см × 25 см з похилом 5 ‰. Дослідження проводили для двох конструкції ПДМЗ. Траншею конструкції ПДМЗ по периметру обклали геосинтетичним матеріалом (ГСМ) та наповнювали різними матеріалами. Конструкція ПДМЗ № 1 складалась із труби полівінілхлориду (ПВХ) діаметром 10 см, обгорнутої ГСМ та обсипаної крупнозернистим митим кварцовим піском фр. 2–3 мм (рис. 3).



а) бокова площина; *б)* торцева площина; I, II, III — відповідно зони проведення вимірювань; 1 — корпус експериментальної установки; 2 — система імітації дощових опадів; 3 — заповнювач дренажної траншеї — кварцовий митий пісок фракції 2–3 мм; 4 — прошарок ГСМ; 5 — дренажна труба ПВХ діаметром 100 мм з отворами; 6 — дренажний шар — митий щебінь фракції 20–40 мм; 7 — ґрунт — супісок пилуватий; 8 — шар дрібнозернистого піску; 9 — відвідний отвір (кран); 10 — передня стінка корпусу експериментальної установки з оргскла; 11 — корпус установки імітації вібрації від автомобіля; 12 — електродвигун ексцентричний ИВ-01-50Е; 13 — демпферний прошарок з гуми; 14 — навантаження на віброустановку; 15 — прилад для регулювання обертів електродвигуна 12; 16 — провід для під'єднання до мережі 220 В

Рисунок 3 — Експериментальна установка з КДМЗ № 1 з труби ПВХ

Конструкція ПДМЗ № 2 була влаштована зі щебеневого ядра: в нижній частині фр. 5–10 мм товщиною 5 см; прошарок із ГСМ; у верхній частині фр. 20–40 мм товщиною 20 см (рис. 4). Наповнена матеріалами траншея, разом із ЗП, накривалися ГСМ. В якості площинного дренажу було влаштовано шар із митого щебню фр. 20–40 мм товщиною 12 см. Установка дорожньої конструкції оснащена системою імітації дощових опадів, яка працювала в режимі інтенсивності дощових опадів 5 % забезпечення згідно метеорологічних даних [5] для Київської області. На поверхню дренуючого шару площею 4 м^2 надходило 25 літрів води.



а) *б)*

а) бокова площина; *б)* торцева площина; I, II, III — відповідно зони проведення вимірювань; 1 — корпус експериментальної установки; 2 — система імітації дощових опадів; 3 — заповнювач дренажної траншеї — митий щебінь фракції 20–40 мм; 4 — прошарок ГСМ; 5 — заповнювач дренажної траншеї — митий щебінь фракції 5–10 мм; 6 — дренажний шар — митий щебінь фракції 20–40 мм; 7 — ґрунт — супісок пилуватий; 8 — шар дрібнозернистого піску; 9 — відвідний отвір (кран); 10 — передня стінка корпусу експериментальної установки з оргскла; 11 — корпус установки імітації вібрації від автомобіля; 12 — електродвигун ексцентричний ИВ-01-50Е; 13 — демпферний прошарок з гуми; 14 — навантаження на віброустановку; 15 — прилад для регулювання обертів електродвигуна 12; 16 — провід для під'єднання до мережі 220 В

Рисунок 4 — Експериментальна установка з КДМЗ № 2 з щебеневого ядра

Попередньо на дренуючий шар було встановлено УІВ, яка починала працювати відразу після закінчення надходження дощових опадів. У процесі проведення експериментальних досліджень підбиралися параметри віброперемiщення, що відповідають легковому та великоваговому ТЗ. Випробування від дії вібрації для кожного дослідження тривало 10 хв.

До складу контрольованих параметрів впливу входили: напруга і сила струму електродвигуна; тривалість випробувань, хв; амплітуда вібрацій, мм; величина питомого статичного навантаження.

Для впливу на ґрунт використовували статичний вантаж 14 (рис. 3, рис. 4), у поєднанні з віброімпульсами. Енергія від електродвигуна 12 (рис. 3, рис. 4) надходила в блок-перетворювач і далі віброімпульси направлялись через демпферний прошарок із гуми 13 (рис. 3, рис. 4) на поверхню дренуючого шару. Блок-перетворювач виконував функцію формування зворотно-поступального руху із заданими параметрами амплітуди і частоти. Для перетворення обертального руху у вібраційний використовувалася схема з ексцентриком.

Під час дослідження проводилися вимірювання: інтенсивності водовідведення дренажної траншеї обох типів конструкцій. Результати вимірювань наведені у табл. 1 і табл. 2. Дослідження проводилися як з вібраційним впливом від ТЗ, так і без нього. Особливість роботи конструкції ПДМЗ № 1 від конструкції ПДМЗ № 2 полягає в тому, що вона працює в двох режимах водовідведення: 1 — сформований потік; 2 — розформований потік (краплі).

Таблиця 1

Загальний об'єм відведеної води з конструкції ПДМЗ № 1

Ч. ч.	Об'єм води, який надійшов до конструкції, л	Об'єм відведеної води під час сформованого потоку, л	Час сформованого потоку, хв	Загальний об'єм відведеної води, л	Загальний час відведення води *t*, хв
Без вібрації					
1	25	8,6	26	10,6	206
2	25	11,5	27	13,5	207
3	25	11,8	26	15,8	206
З вібрацією					
4	25	10,5	20	14,3	203
5	25	11,7	28	14,0	205

Інтенсивність водовідведення конструкції ПДМЗ № 2 перевищувала відповідний показник конструкції ПДМЗ № 1.

Таблиця 2

Загальний об'єм відведеної води з конструкції ПДМЗ № 2

Ч. ч.	Об'єм води, який надійшов до конструкції, л	Об'єм відведеної води під час сформованого потоку, л	Час сформованого потоку, хв	Загальний об'єм відведеної води, л	Загальний час відведення води *t*, хв
Без вібрації					
1	25	13,3	32	13,3	32
2	25	14,0	41	14,0	41
3	25	16,7	18	16,7	18
З вібрацією					
4	25	17,0	16	17,0	16
5	25	16,0	22	16,0	22

Для адаптації результатів експериментальних досліджень відповідно до натурних умов та отримання уніфікованих залежностей необхідно було провести кореляційно-регресійний аналіз і виконати серію числових експериментів на їх основі.

Аналіз кореляційного поля між кількістю відфільтрованої води та часом її фільтрування дозволяє висунути гіпотезу про наявність функціонального зв'язку між цими двома величинами. Перевірку даної гіпотези виконували на основі методів кореляційно-регресійного аналізу [6, 7].

Рівняння регресії прийняли у вигляді гіперболічної функції виду:

$$\hat{Q}(t) = a + \frac{b}{t} \quad , \tag{1}$$

де $\hat{Q}(t)$ — розрахункова кількість відведеної води (по відношенню до початкового об'єму);

t — час відведення води, хв.;

$a, \rightleftarrows\rightleftarrows b$ — безрозмірні параметри регресії.

Коефіцієнти *a* та *b*, що входять до рівнянні регресії (1) визначають на основі методу найменших квадратів (МНК) за формулами [6, 7]:

$$b = \frac{n\sum\frac{Q_i}{t_i} - \sum\frac{1}{t_i}\cdot\sum Q_i}{n\sum\frac{1}{t_i^2} - \left(\sum\frac{1}{t_i}\right)^2}, \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{n}\sum Q_i - \frac{b}{n}\frac{1}{t_i}. \quad (3)$$

Для оцінки щільності зв'язку між досліджуваними параметрами обчислюють коефіцієнт парної кореляції за формулою:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum(Q_{i.} - \hat{Q}_i)^2}{\sum(Q_i - \bar{Q}_i)^2}}. \quad (4)$$

Значимість параметрів регресії оцінюють за F-критерієм Фішера для прийнятого рівня значущості *б*, порівнюючи його критичне (табличне) значення $F_{табл.}$ з фактичним значенням $F_{факт.}$, що визначається за формулою:

$$F_{факт.} = \frac{R^2}{1 - R^2}\cdot\frac{k_2}{k_1}, \quad (5)$$

де $k_1 = m$; $k_2 = n - m - 1$;

m — кількість параметрів при факторній ознаці;

n — кількість спостережень.

Виконавши розрахунки за формулами (1)—(5) із використанням даних експериментальних досліджень були отримані наступні результати кореляційно-регресійного аналізу (табл. 3, рис. 5).

Таблиця 3

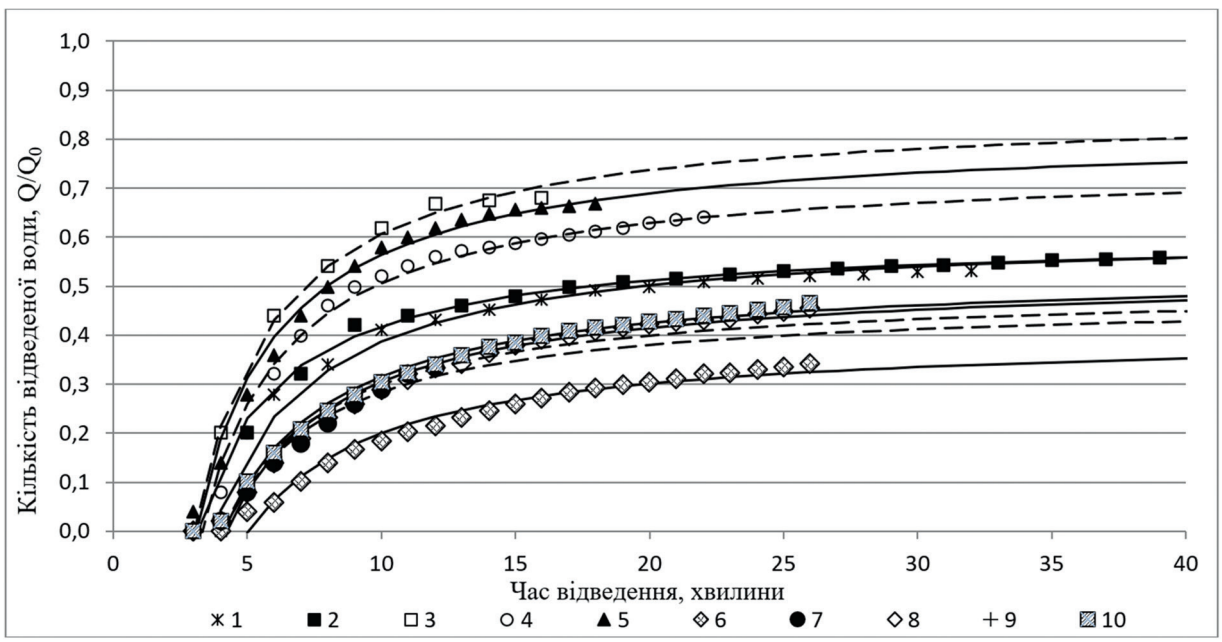
Результати кореляційно-регресійного аналізу експериментальних даних

Ч. ч.		Рівняння кореляційно-регресійної моделі	Коефіцієнт кореляції	Коефіцієнт детермінації	Значення критерію Фішера при *б* = 0,05	
					Критичне значення	Фактичне значення
1	2	3	4	5	6	7
Конструкція ПДМЗ № 1 (дренаж труба, щебінь, без вібрації)						
1	Експеримент 1 ($W_{зп}$=11,4 %)	$\hat{Q}(t) = 0,356 - \frac{1,3924}{t}$	0,9325	0,8809	4,3009	162,7200
2	Експеримент 2 ($W_{зп}$=11,3 %)	$\hat{Q}(t) = 0,4958 - \frac{1,8178}{t}$	0,9674	0,9358	4,3009	320,8300
3	Експеримент 3 ($W_{зп}$=11,0 %)	$\hat{Q}(t) = 0,5064 - \frac{1,82}{t}$	0,9746	0,9498	4,3009	416,2400
Конструкція ПДМЗ № 1 (дренаж труба, щебінь, вібрація)						
4	Експеримент 4 ($W_{зп}$=12,0 %)	$\hat{Q}(t) = 0,4766 - \frac{1,929}{t}$	0,9876	0,9754	5,5914	277,1005
5	Експеримент 5 ($W_{зп}$=10,9 %)	$\hat{Q}(t) = 0,4988 - \frac{2,0083}{t}$	0,9938	0,9877	5,5914	563,1400

Кінець таблиці 3

	1	2	3	4	5	6
Конструкція ПДМЗ № 2 (дренаж, щебінь, без вібрації)						
6	Експеримент 6 ($W_{зп}$=13,6 %)	$\hat{Q}(t)=0{,}6159-\frac{2{,}2944}{t}$	0,9905	0,981	4,6672	671,8100
7	Експеримент 7 ($W_{зп}$=13,1 %)	$\hat{Q}(t)=0{,}6052-\frac{1{,}8677}{t}$	0,9971	0,9942	4,4139	3111,1400
8	Експеримент 8 ($W_{зп}$=13,0 %)	$\hat{Q}(t)=0{,}8158-\frac{2{,}5108}{t}$	0,9916	0,9832	4,6001	821,1900
Конструкція ПДМЗ № 2 (дренаж, щебінь, вібрація)						
9	Експеримент 9 ($W_{зп}$=13,0 %)	$\hat{Q}(t)=0{,}8706-\frac{2{,}6429}{t}$	0,9984	0,9968	5,98	1894,6410
10	Експеримент 10 ($W_{зп}$=12,5 %)	$\hat{Q}(t)=0{,}8706-\frac{2{,}7318}{t}$	0,9902	0,9805	4,4139	904,4564

На основі отриманих рівнянь кореляційно-регресійних моделей (табл. 3), побудовані апроксимаційні криві експериментальних даних (рис. 5).



1, 2, 3, 4, 5 — Конструкція ПДМЗ № 2 (вологості земляного полотна відповідно 13,6 %, 13,1 %, 13 %, 13 %, 12,5 %); 6, 7, 8, 9, 10 — Конструкція ПДМЗ № 1 (вологості земляного полотна відповідно 11,4 %, 12 %, 11,3 %, 10,9 %, 11 %). Суцільна лінія — без вібрації, пунктирна лінія — з вібрацією

Рисунок 5 — Апроксимація експериментальних даних регресійними залежностями

Для уніфікації рівнянь, наведених у табл. 3, потрібно визначити залежність режиму роботи дренажних конструкцій від вологості земляного полотна $W_{зп}$.

Виходячи з експериментальних замірів вологостей земляного полотна $W_{зп}$ для кожного з експериментів були визначені коефіцієнти a і b для регресійних моделей, наведених у табл. 1 у вигляді функціональних залежностей:

$$\begin{cases} a(W_{зп}) = a_1 W_{зп} + b_1, \\ b(W_{зп}) = a_2 W_{зп} + b_2. \end{cases} \tag{6}$$

Підставивши експериментальні та розрахункові дані в (6) отримаємо:

– для конструкції ПДМЗ № 1, з вібрацією:

$$\begin{cases} 0,4766 = 11,1a_1 + b_1, \\ 0,4998 = 10,4a_1 + b_1 \end{cases} \Rightarrow a_1 = -0,0331; b_1 = 0,8445; \tag{7}$$

$$\begin{cases} -1,929 = 11,1a_2 + b_2, \\ -2,0083 = 10,4a_2 + b_2 \end{cases} \Rightarrow a_2 = 0,1133; b_2 = -3,1865; \tag{8}$$

$$\begin{cases} a\left(W_{зп}\right) = -0,0331W_{зп} + 0,8445, \\ b\left(W_{зп}\right) = 0,1133W_{зп} - 3,1865. \end{cases} \tag{9}$$

– для конструкції ПДМЗ № 2, з вібрацією:

$$\begin{cases} 0,8706 = 13a_1 + b_1, \\ 0,7753 = 11,3a_1 + b_1 \end{cases} \Rightarrow a_1 = 0,0561; b_1 = 0,1418; \tag{10}$$

$$\begin{cases} -2,6429 = 13a_2 + b_2, \\ -2,7318 = 11,3a_2 + b_2 \end{cases} \Rightarrow a_2 = 0,0523; b_2 = -3,3227; \tag{11}$$

.

$$\begin{cases} a\left(W_{зп}\right) = 0,0561W_{зп} + 0,1418, \\ b\left(W_{зп}\right) = 0,0523W_{зп} - 3,3227. \end{cases} \tag{12}$$

Аналогічним чином були визначені параметри $a(W_{зп})$, $b(W_{зп})$ для роботи установок без вібрації.

Таким чином, підставивши отримані вирази для $a(W_{зп})$, $b(W_{зп})$ у рівняння (табл. 3) отримаємо кореляційно-регресійні залежності для визначення інтенсивності водовідведення для кожної із дренажних конструкції залежно від початкової вологості земляного полотна.

Для конструкції ПДМЗ № 1:

– без вібрації:

$$\hat{Q}(t) = \left(\frac{0,3887}{t} - 0,1367\right) \cdot W_{зп} - \frac{6,0571}{t} + 1,9967; \tag{13}$$

– з вібрацією:

$$\hat{Q}(t) = \left(\frac{0,1133}{t} - 0,0331\right) \cdot W_{зп} - \frac{3,1865}{t} + 0,8445; \tag{14}$$

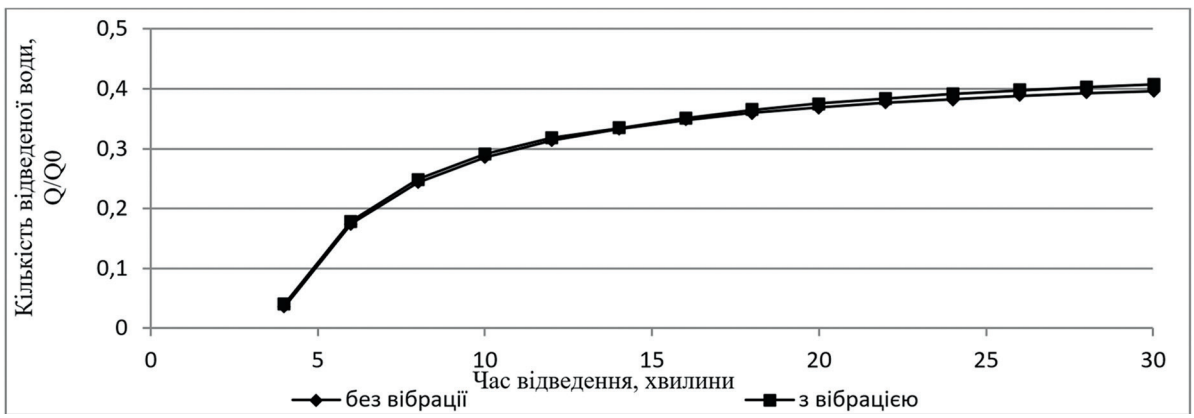
Для конструкції ПДМЗ № 2:

– без вібрації:

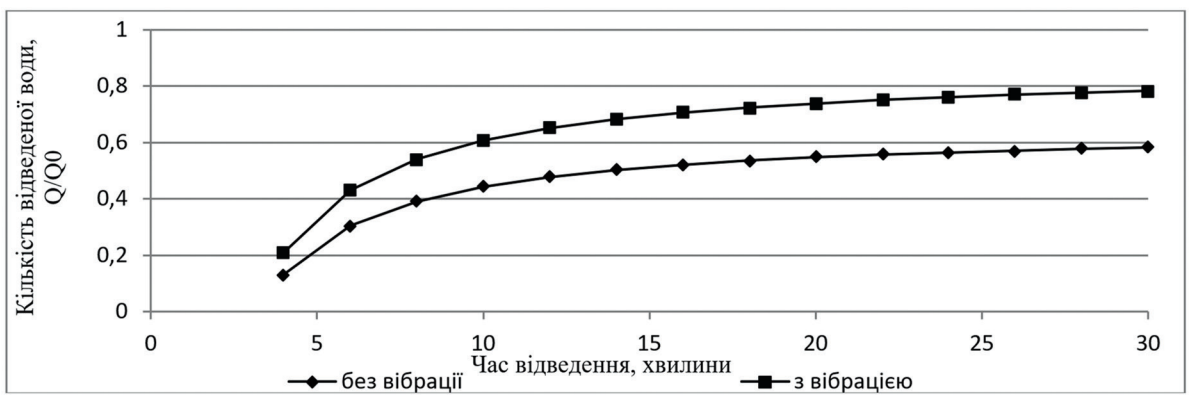
$$\hat{Q}(t) = \left(\frac{0,2543}{t} - 0,0965\right) \cdot W_{ЗП} - \frac{5,3857}{t} + 1,9059; \quad (15)$$

– з вібрацією:

$$\hat{Q}(t) = \left(\frac{0,0523}{t} + 0,0561\right) \cdot W_{ЗП} - \frac{3,3227}{t} + 0,1418. \quad (16)$$



а)



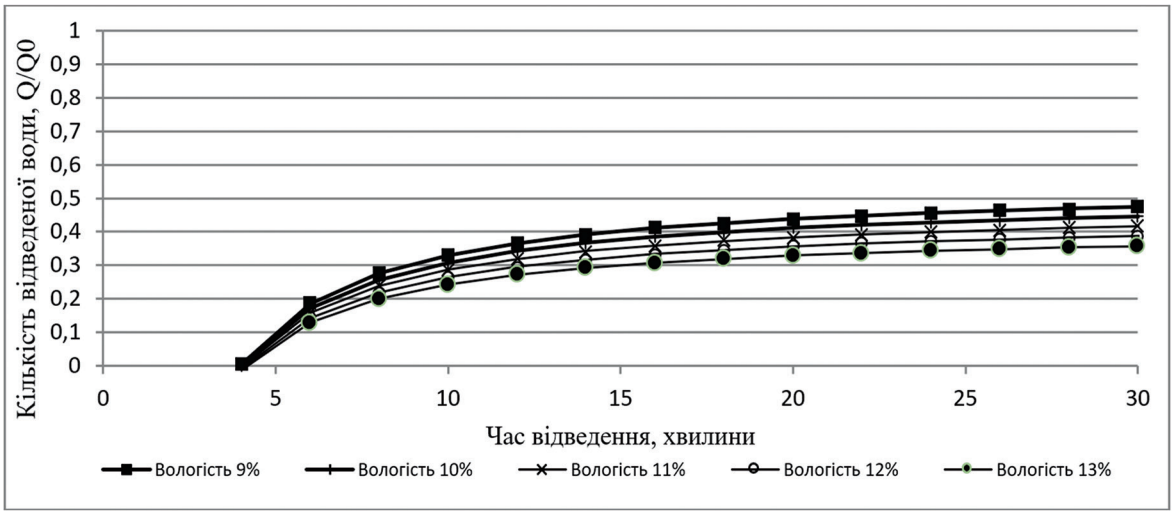
б)

Рисунок 6 **—** Залежність впливу вібрації на інтенсивність водовідведення на початковому етапі впливу вібрації: *а)* конструкція ПДМЗ № 1; *б)* конструкція ПДМЗ № 2

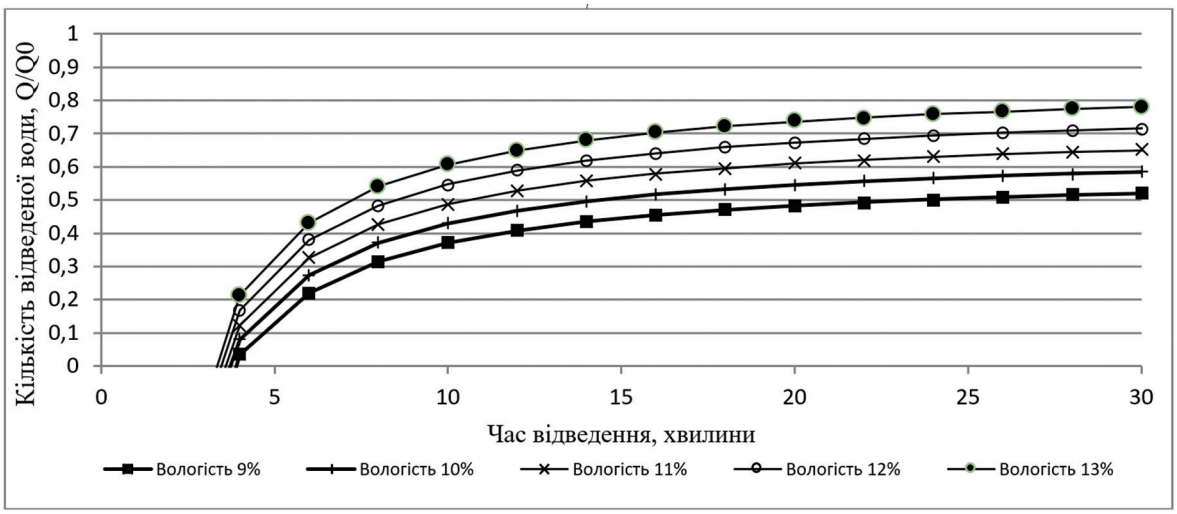
На основі отриманих залежностей було проведено серію числових експериментів із дослідження впливу вібрації на інтенсивність водовідведення дренажними установками залежно від вологості земляного полотна.

Зокрема, було досліджено залежність впливу вібрації на інтенсивність водовідведення на початковому етапі експлуатації дренажних конструкцій (рис. 6). Аналіз графіків (рис. 6) дозволяє зробити висновок, що на початковому етапі впливу вібрації для конструкції ПДМЗ № 1 інтенсивність водовідведення мало змінюється, тоді як для конструкції ПДМЗ № 2 цей вплив є більш суттєвим.

Відповідно до отриманих залежностей побудовані числові залежності інтенсивності водовідведення за різних значеннь вологостей ЗП.



а)



б)

Рисунок 7 — Часові залежності інтенсивності водовідведення при різних вологостях земляного полотна під впливом вібрації: *а)* конструкція ПДМЗ № 1; *б)* конструкція ПДМЗ № 2

Аналіз графіків функцій (рис. 6, рис. 7) показав, що за одних і тих самих значеннях аргументу (часу водовідведення) для конструкції ПДМЗ № 1 значення функції (кількість відведеної води) близькі один до одного (в межах 2–3 %), у випадку конструкції ПДМЗ № 2 — їх різниця є більш суттєвою (в межах 25 %). Це можна пояснити тим, що наповнювач траншеї в конструкції ПДМЗ № 2 має контактну структуру з більшим коефіцієнтом фільтрації порівняно з наповнювачем конструкції ПДМЗ № 1. Але слід зазначити, що за збільшення інтенсивності водовідведення під впливом вібрації в конструкції ПДМЗ № 2 відбувається більше замулювання ГСМ, що з часом може привести до зменшення його водопроникності (рис. 8).

Рисунок 8 **—** Стан ГСМ після проведення експериментальних досліджень в конструкції ПДМЗ № 2

Спостерігалося замулювання ГСМ, який був розложений на земляному полотні під дренажним щебеневим шаром. Тому (якщо це передбачено проєктом) влаштовувати дренажні шари необхідно з митого щебеню з метою забезпечення необхідної інтенсивності водовідведення всієї дренажної конструкції, що вимагає додаткового часу для проведення наступних досліджень.

– побудувати та дослідити кореляційно-регресійні залежності для визначення інтенсивності водовідведення кожного типу конструкції ПДМЗ.

Висновки

1. Проведено моделювання впливу вібрації на дорожню конструкцію на основі параметру вібропереміщення, який відповідає дії від транспортних засобів. У результаті було визначено, що при русі легкових ТЗ з масою до 2 тонн зі швидкістю 60 км/год вібропереміщення складало до 0,003 мм; при русі вантажних ТЗ з масою більше 20 тонн та кількістю вісей 6 од. зі швидкістю 60 км/год — до 0,018 мм. Відповідно до проведених натурних вимірювань показників вібрації, було спроєктовано та побудовано установку імітації вібрації (УІВ) від дії ТЗ. В процесі проведення експериментальних досліджень підбиралися параметри вібропереміщення, що відповідають легковому та великоваговому ТЗ.

2. Робота двох типів конструкцій ПДМЗ розглядалася при інтенсивності зливових опадів 5 % забезпеченості. Наведені результати дослідження інтенсивності водовідведення двох типів конструкцій ПДМЗ під впливом та без дії вібрації. Аналіз експериментальних досліджень дозволяє зробити висновок про те, що конструкція ПДМЗ № 2 з щебеневим ядром відводить більшу кількість

води в середньому на 10 % без впливу вібрації, та на 14 % більше під впливом вібрації, за часом, відповідно, у 7 та 11 разів швидше, ніж конструкція ПДМЗ № 1 з трубчастою дреною. Це дає підставу стверджувати про її більш високу ефективність роботи. Але порівнюючи відповідні типи конструкцій ПДМЗ між собою без дії вібрації та з нею, можна дійти висновку, що на інтенсивність водовідведення конструкції ПДМЗ № 1 вібрація майже не впливає за рахунок того, що труба ПВХ має подвійний захист — наповнювач з крупнозернистого піску та геотекстиль, який обгорнутий на тілі труби. Що стосується інтенсивності водовідведення конструкції ПДМЗ № 2, то дія вібрації її посилює за рахунок більшого коефіцієнта фільтрації наповнювача траншеї, але такий процес суттєво впливає на замулювання шару ГСМ в конструкції і відповідно на довговічність її роботи.

3. На основі представлених результатів отримано кореляційно-регресійні залежності для визначення інтенсивності водовідведення для кожної із дренажних конструкції залежно від початкової вологості земляного полотна. Надійність та значимість регресійних моделей підтверджується показниками коефіцієнтів парної кореляції, детермінації та критеріїв Фішера. Це дає можливість адаптувати результати експериментальних досліджень д натурних умов при відомих змінах вологості ґрунту, з якого буде влаштовуватись ЗП.

Список літератури

1. Dawson A. Water in Road Structures: Movement, Drainage and Effects (Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*). Springer Netherlands*. 2009. Volume 7. 464 p.

2. Slavinska O., Savenko V., Bubela A., Yaremov A. Investigation of the work of the road construction at the sites by pipedrenes from materials of different origin. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Volume 2, Issue 7-92. С. 18–26. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126512 (дата звернення: 20.04.2020).

3. Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S. The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab®approach. *European Transport Research Review*. 2014. Volume 6. P. 267–275. DOI: https://doi.org/10.1007/s12544-013-0127-8 (дата звернення: 20.04.2020).

4. Долгов Д.В. Влияние частоты и амплитуды вибрационного воздействия на характер деформационного поведения связанных грунтов. *Строительные и дорожные машины*. 2013. № 6. С. 45–47.

5. Довідник № 4. Кліматичні характеристики та кліматичне районування території України для регулювання водно-теплового режиму в дорожньому будівництві. *UKRAVTODOR: NTU*. 2018. 98 с. (Інформація та документація).

6. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб пособие для вузов. 9-е изд. Москва, 2003. 479 с.

7. Огірко О.І., Галайко Н.В. Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник. Львів, 2017. 292 с.

References

1. Dawson A. Water in Road Structures: Movement, Drainage and Effects (Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering). *Springer Netherlands*. 2009. Volume 7. 464 p. [in English].

2. Slavinska O., Savenko V., Bubela A., Yaremov A. Investigation of the work of the road construction at the sites by pipedrenes from materials of different origin. E*astern-European Journal of*

Enterprise Technologies. 2018. Volume 2, Issue 7-92. C. 18–26. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126512 (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

3. Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S. The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab®approach. *European Transport Research Review*. 2014. Volume 6. P. 267–275. DOI: https://doi.org/10.1007/s12544-013-0127-8 (Last accessed: 20.04.2020) [in English].

4. Dolhov D.V. Vliyaniye chastoty i amplitudy vibratsionnogo vozdeystviya na kharakter deformatsionnogo povedeniya svyazannykh gruntov (Impact of frequency and amplitude of vibration on the nature of deformation behavior of bound soils). *Construction and road machines*. 2013. № 6. P. 45–47. [in Russian].

5. Dovidnyk № 4. Klimatychni kharakterystyky ta klimatychne rayonuvannya terytoriyi Ukrayiny dlya rehulyuvannya vodno-teplovoho rezhymu v dorozhn′omu budivnytstvi (Manual № 4. Climatic characteristics and climatic zoning of the territory of Ukraine for the regulation of water-thermal mode in road construction). *UKRAVTODOR: NTU*. Kyiv, 2018. 98 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

6. Hmurman V.E. Teoryya veroyatnostey y matematycheskaya statystyka: Ucheb posobye dlya vuzov (Probability theory and mathematical statistics: Manual for Universities). 9th Issue. Moscow, 2003. 479 p. [in Russian].

7. Ohirko O.I., Halaiko N.V. Teoriya ymovirnostey ta matematychna statystyka (Probability theory and mathematical statistics) : Manual. Lviv, 2017. 292 p. [in Ukrainian].

Olena Slavinska, *D.Sc., Prof., http://orcid.org/0000-0002-9709-0078*
Andrii Bubela, *Ph.D., Associate Prof., http://orcid.org/0000-0002-5619-003X*
Lyudmila Bondarenko, *Ph.D., Associate Prof., http://orcid.org/0000-0002-8239-065X*
Oleksandr Chechuha, *Ph.D., Associate Prof., http://orcid.org/0000-0003-1643-6354*

National Transport University, Kyiv, Ukraine

RESEARCH OF THE WORK OF SMALL DRAINAGE DRAINAGE ON THE INTENSITY OF DRAINAGE, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF VIBRATION

Abstract

Introduction. A critical consequence of insufficient drainage and overwetting of the road structure is a reduction in its strength and bearing capacity due to decrease of the elasticity modulus of the subgrade soils and the pavement base layers. Attempts of sealing the road pavement are not always effective; the deterioration of its riding qualities during operation cannot reduce the intensity of water penetration into the road structure. It requires the arrangement of shallow drainage systems, especially on the overwetted road sections.

Issue statement. Shallow drainage systems are arranged in the working area of the subgrade, they are underground structures which makes it impossible to monitor their performance. Analysis of the research provided in the paper causes the need to identify the efficiency of shallow drainage systems performance, both by the intensity of drainage and under the impact of vibration from vehicles. The only way to solve this urgent issue is to conduct experimental research on large-scale models that maximally meet the field conditions.

Objective. The objective of this work is to study the performance of transverse shallow drainage systems (TShD) by the intensity of drainage taking into account the impact of vibration using the laboratory facility of the road structure.

Materials and methods. In the educational and scientific laboratory of the Department of Transport Construction and Property Management of the National Transport University, a series of studies of two types of shallow drainage systems with tubular drain covered with coarse sand and crushed stone core was carried out on an experimental facility of the road structure. The installation parameters correspond to the III and IV categories of the highway. In accordance with the field measurements of vibration indicators, the facility simulating the vibration from the vehicles was designed and built. The experiments were performed both with and without vibration impact from vehicles. The road structure facility is equipped with a rainfall simulation system which operated in the mode of rainfall intensity of 5 % precipitations.

Results. During the research, the modes of water flow formation were determined and the intensity of draining by a drainage trench with a tubular drain and by a drainage trench with a crushed stone core was measured. According to the results of measurements, the impact of vibration from the vehicles on two types of drainage systems was analyzed and correlation-regression dependencies to determine their drainage intensity depending on the initial humidity of the subgrade were obtained.

Conclusions. According to the results of experimental studies, the shallow drainage system with crushed stone core drains more water by an average of 10 % without vibration impact, and by 14 % more under the vibration impact, in time, respectively, in 7 and 11 times faster than the system with tubular drain. This confirms its higher efficiency. When comparing the respective types of drainage systems with each other without vibration and with it, it can be concluded that the intensity of drainage of the system with a tubular drain is almost not affected by vibration.

Keywords: vibration, road structure, shallow drainage, drainage layer, drainage pipe, crushed stone core.