

УДК 625.70

НАДІЙНІСТЬ КОНСТРУКЦІЇ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ЗА КРИТЕРІЄМ ЗСУВУ У ҐРУНТІ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

І. П. Гамеляк, Д. В. Волощук

Теоретично встановлено можливість застосування основних положень класичної теорії надійності при проектуванні конструкцій нежорстких дорожніх одягів за критерієм зсуву у ґрунті.

Встановлено основні закономірності для розрахунку неоднорідності конструкції дорожніх одягів за даним критерієм граничного стану. У статистичній постановці отримано залежності для розрахунку розкиду зсуваючих напружень. За допомогою отриманих залежностей побудовано номограми для розрахунку коефіцієнта варіації активних та допустимих зсуваючих напружень. Отримані формули є теоретичною основою для розрахунку однорідності та надійності двошарових та багатошарових систем за критерієм міцності зсуву у ґрунті чи незв'язних шарах КДО.

Ключові слова: дорожній одяг, граничний стан, зсуваючі напруження, міцність, номограми.

НАДЕЖНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ПО КРИТЕРИЮ СДВИГА В ҐРУНТЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

І. П. Гамеляк, Д. В. Волощук

Теоретически установлена возможность применения основных положений классической теории надежности при проектировании конструкций нежестких дорожных одежд по критерию сдвига в почве.

Установлены основные закономерности для расчета неоднородности конструкций дорожных одежд по данному критерию предельного состояния. В статистической постановке получены зависимости для расчета разброса сдвигающих напряжений. С помощью полученных зависимостей построены номограммы для расчета коэффициента вариации активных и допустимых сдвигающих напряжений. Полученные формулы является теоретической основой для расчета однородности и надежности двухслойных и многослойных систем по критерию прочности сдвига в почве или несвязных слоях КДО.

Ключевые слова: дорожная одежда, предельное состояние, напряжения сдвига, прочность, номограммы.

RELIABILITY OF ROAD CONSTRUCTION CONSIDERING SHIFT FACTOR IN SOIL SUBGRADE

I. Gameliak, D. Voloshchuk

Theoretically established the applicability of the main provisions of classical reliability theory in the design of structures for non rigid pavements criterion shift in the soil.

The basic laws for calculating the structural heterogeneity of pavements on this criterion limiting condition. In statistical formulation obtained depending spread shifting to calculate stresses. With dependencies built nomogram to calculate the coefficient of variation of active and allowable stresses shifting. The resulting formula is the theoretical basis for the calculation of uniformity and reliability of dual-layer and multi-layer systems for shear strength criterion in soil layers or disconnected pavements.

Keywords: pavement, ultimate state, shifting tension, strength, nomogram.

Вступ. Стан дорожнього господарства на сьогоднішній день потребує залучення сучасних підходів до вирішення актуальних проблем, що супроводжують етапи проектування, будівництва та експлуатації автомобільних доріг. Прогрес рухається шляхом накопичення та вдосконалення існуючого досвіду з врахуванням сучасних тенденцій та підходів. В останні роки інтерес науковців сконцентровано на новітніх технологіях та матеріалах, які спрямовані на підвищення надійності конструкцій дорожніх одягів (КДО), їх технологічній та економічній ефективності. Питання пов'язані з основою земляного полотна відходять на другорядний план, проте їх значимість надзвичайно висока.

Постановка проблеми. При розрахунках конструкцій дорожнього одягу основним визначальним (у більше як 85 %) є критерій граничного стану на зсув в ґрунті земляного полотна або шарах з незв'язних матеріалів. Більше 97 % автомобільних доріг України мають в основі незв'язні матеріали, тому вирішення проблеми забезпечення надійності та довговічності КДО за критерієм зсуву є актуальною задачею. Розрахунок конструкції дорожнього одягу починається саме з ґрунтової основи. Виходячи з ґрунтово-геологічних умов приймаються рішення щодо подальших методів регулювання водно-теплого режиму та призначення конструкції дорожнього одягу [1]. Враховуючи роль цього питання в загальній надійності дорожньої конструкції виникає необхідність повернутися до витоків зародження цього напрямку, проаналізувати існуючі на сьогоднішній день результати щоб розробити нові.

Основна частина. Одним із ключових моментів при проектуванні автомобільних доріг є забезпечення їх надійності та довговічності. Надійністю конструкції дорожнього одягу (КДО) є імовірність її безвідмовної роботи протягом проектного строку експлуатації [2]:

$$H = R(t) = 1 - F(t) = P(t \leq T), \quad (1)$$

де $R(t)$ – імовірність безвідмовної роботи;
 T – значення критерію, що характеризує безвідмовну роботу;
 $F(t)$ – імовірність виходу КДО із ладу в момент часу t ;
 P – імовірність відмови КДО.

При апроксимації міцності та напруження законами Вейбулла надійність, згідно [3] визначається із інтегрального виразу:

$$\bar{R} = P(S \leq s) = \int_{s_0}^{\infty} e^{-y} e^{-\left(\frac{\theta_S y^{\frac{1}{\beta_S} + \frac{s_0 - s_0}{\theta_S}}}{\theta_S}\right)^{\beta_S}} dy \quad (2)$$

При нормальних законах розподілу «міцності» та «напруження» надійність конструкції дорожнього одягу характеризує взаємодія її міцності з напруженнями, що виникають [4] та виражається через коефіцієнт надійності:

$$K_M = 0,5 + F(\beta), \quad (3)$$

де $F(\beta)$ – нормована функція Лапласа;
 β – характеристика безпеки, для критерію зсуву згідно [2];

$$\beta = \frac{\tau_{\text{доп}} - \tau_{\text{акт}}}{\sqrt{S_{\tau_{\text{доп}}}^2 + S_{\tau_{\text{акт}}}^2}} \quad \text{або} \quad \beta = \frac{K_M - 1}{\sqrt{C_{\tau_{\text{доп}}}^2 \cdot K_M^2 + C_{\tau_{\text{акт}}}^2}}, \quad (4)$$

де $\tau_{\text{доп}}$ – допустиме напруження зсуву в ґрунті земляного полотна, яке залежить від зчеплення в ґрунті земляного полотна C_{sp} , кута внутрішнього тертя в ґрунті земляного полотна φ , загальної товщини шарів дорожнього одягу h_S , що розташовані вище поверхні земляного полотна, сумарної кількості прикладення навантаження від коліс транспортних засобів по одному сліду за проектний строк експлуатації ΣN_p для [5-7] або середньодобової кількості прикладення навантаження N_p для [8];

$\tau_{\text{акт}}$ – активне напруження зсуву, яке залежить від середнього модуля пружності шарів дорожнього одягу E_{sp} , модуля пружності ґрунту земляного полотна E_{gp} , кута внутрішнього тертя в ґрунті земляного полотна φ , діаметру відбитку D та тиску p колеса транспортного засобу;

$S_{\tau_{\text{доп}}}$ і $S_{\tau_{\text{акт}}}$ – середньоквадратичні відхилення допустимого та відповідно активного напруження зсуву;

$C_{\tau_{\text{доп}}}$ і $C_{\tau_{\text{акт}}}$ – коефіцієнти варіації допустимого та відповідно активного напруження зсуву;

K_M – коефіцієнт запасу міцності:

$$K_M = \tau_{\text{доп}} / \tau_{\text{акт}}, \quad (4)$$

На сьогоднішній день для розрахунку конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу по критерію граничного стану за умовою зсувостійкості земляного полотна та шарів із малозв'язних матеріалів є такі методики: ВБН В.2.3-186 «Дорожній одяг нежорсткого типу» [5], М 218-02070915-633 «Методика проектування дорожнього одягу з конструкціями різного типу» [6], ОДН

218.046 «Проектирование нежестких дорожных одежд» [7] – діючі, та ВСН 46-83 «Инструкция по проектирования дорожных одежд нежесткого типа» [8] – не діючий. Формули для розрахунку допустимого $\tau_{доп}$ та активного $\tau_{акт}$ напруження зсуву за цими методиками зведені в таблицю 1.

Для порівняння наведених методик до розрахунку прийнято конструкцію нежорсткого дорожнього одягу, що наведена в Додатку Л [5] з наступними конструктивними шарами та їх характеристиками:

Асфальтобетон щільний на бітумі БНД-60/90 – h=6 см, E=1800 МПа.

Асфальтобетон пористий на бітумі БНД-40/60 – h=8 см, E=1700 МПа.

Асфальтобетон пористий на бітумі БНД-60/90 – h=10 см, E=1200 МПа.

Ґравійно-піщана суміш оптимального складу укріплена цементом – h=22 см, E=530 МПа.

Рядовий шлаковий щебінь – h=26 см, E=200 МПа.

Ґрунт земляного полотна – суглинок легкий пілуватий з $W_p=0,6W_T$ – E=77 МПа.

Головна відмінність розрахунку між діючими методиками [5-7] та відмінним ВСН 46-83 [8] полягає у визначенні допустимого напруження зсуву $\tau_{доп}$ в залежності від сумарної кількості прикладень навантаження ΣN_p та відповідно від середньодобової N_p , крім того формула для розрахунку активного напруження зсуву $\tau_{акт}$ за ВСН 46-83 [8] враховує навантаження від власної ваги насипу, що за методиками [5-7] враховується при розрахунку допустимого напруження зсуву $\tau_{доп}$. Результати розрахунку за наведеними методиками коефіцієнту запасу міцності K_m , а також допустимого $\tau_{доп}$ та активного $\tau_{акт}$ напруження зсуву при змінній сумарній кількості прикладення навантаження ΣN_p зведено в таблицю 2.

Аналіз розрахункових даних з табл. 2 свідчить про близькість результатів за різними методиками [5-7]. Однак, зазначені методики, дещо відрізняються між собою, а саме в частині визначення допустимого напруження зсуву $\tau_{доп}$, МПа.

При розрахунку $\tau_{доп}$, за [5] приймається динамічне значення кута внутрішнього тертя ґрунту φ , тобто таке, що залежить від ΣN_p . на відміну від [6] та [7], де воно є сталим при різних величинах інтенсивності руху транспортних засобів. Коефіцієнт k_o формулі $\tau_{доп}$ [6] винесено за дужки, таким чином застосовуючи його не тільки до зчеплення в ґрунті C_N , а і до частини, що враховує напруження від власної ваги КДО. В цілому, ці відмінності наближають результати розрахунку за М 218-02070915–633 [6] до ОДН 218.046 [7], але з врахуванням регіональних особливостей України та вимог ВБН В.2.3-186 [5].

Таблиця 1 – Розрахунок допустимого та активного напруження зсуву за методиками [5-8]

Назва методики	Допустиме напруження зсуву $\tau_{доп}$	Активне напруження зсуву $\tau_{акт}$
ВБН В.2.3-186 [5]	$\tau_{доп} = c_N k_d + 0,1 \rho_{ср} h_{\Sigma} tg(\varphi_N)$	$\tau_{акт} = \bar{\tau}_H \cdot p$ або $\tau_{акт} = \frac{p \cdot \exp(-\varphi/33)}{100D^2 + 57(h_{\Sigma} \sqrt[3]{E_{ср} / E_{ср}})^2}$
М 218-02070915–633 [6]	$\tau_{доп} = k_d (c_N + 0,1 \rho_{ср} h_{\Sigma} tg(\varphi_{ст}))$	
ОДН 218.046 [7]	$\tau_{доп} = c_N k_d + 0,1 \rho_{ср} h_{\Sigma} tg(\varphi_{ст})$	
ВСН 46-83 [8]	$\tau_{доп} = c_N k_1 [1,822 - 0,15 \cdot \ln(N_p)] k_3$	$\tau_{акт} = \tau_H + \tau_E$
		$\tau_H = \bar{\tau}_H \cdot p$ або $\tau_H = \frac{p \cdot \exp(-\varphi/33)}{100D^2 + 57(h_{\Sigma} \sqrt[3]{E_c / E_{ср}})^2}$
		$\tau_E = 10^{-5} (5 - 0,3\varphi) h_{\Sigma}$

де C_N – зчеплення в ґрунті земляного полотна, що залежить від ΣN_p ; k_o – коефіцієнт, що враховує особливості роботи конструкції на межі піщаного шару з нижнім шаром несучої основи; k_1 – коефіцієнт, що враховує зниження опору ґрунту зсуву під дією рухомих навантажень, коливань, тощо; k_3 – коефіцієнт, що враховує особливості роботи ґрунту в конструкції, які пов'язані зі збільшенням фактичного зчеплення в ґрунті за рахунок затиснення, явища ділатансії та затиснення частинок; $\rho_{ср}$ – середня щільність матеріалів шарів дорожнього одягу; φ_N , $\varphi_{ст}$ – кут внутрішнього тертя в ґрунті земляного полотна, що залежить від ΣN_p та відповідно його табличне значення; τ_H , τ_E – активне напруження зсуву від тимчасового навантаження та відповідно від власної ваги шарів, що розташовані вище; $\bar{\tau}_H$ – питоме активне напруження зсуву від одиничного навантаження, що визначається за номограмою.

Таблиця 2 – Результати розрахунку конструкції нежорсткого типу за критерієм міцності зсуву у ґрунті земляного полотна та шарах з малозв’язних матеріалів за методиками [5-8] у залежності від сумарної кількості прикладання навантаження

Методика розрахунку	Показник	Сумарна кількість прикладення навантаження, ΣN_p				
		1	10^3	10^4	10^5	10^6
ВБН В.2.3-186 [5]	$\tau_{дон}, \text{МПа}$	0,035	0,024	0,021	0,017	0,013
	$\tau_{акт}, \text{МПа}$	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
	K_M	4,7	3,2	2,7	2,2	1,8
М 218-02070915–633 [6]	$\tau_{дон}, \text{МПа}$	0,036	0,027	0,024	0,021	0,018
	$\tau_{акт}, \text{МПа}$	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
	K_M	4,7	3,5	3,1	2,7	2,3
ОДН 218.046 [7]	$\tau_{дон}, \text{МПа}$	0,036	0,027	0,024	0,021	0,018
	$\tau_{акт}, \text{МПа}$	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
	K_M	4,8	3,5	3,1	2,7	2,3
ВСН 46-83 [8]*	$\tau_{дон}, \text{МПа}$	0,08	0,052	0,043	0,033	0,024
	$\tau_{акт}, \text{МПа}$	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
	K_M	13,3	8,7	7,1	5,6	4,01

*Сумарна кількість прикладення навантажень приведена до середньодобової без врахування показника зміни інтенсивності за роками

Описана відмінність добре простежується при здійсненні оберненого розрахунку із заданим $K_M=1,5$ згідно [5]. Рішення по визначенню h_Σ при змінній інтенсивності прикладення навантаження ΣN_p реалізовано в системі MathCad 14 з використанням вбудованої функції *root*. Результати розрахунку наведено в графічному вигляді на рис. 1.

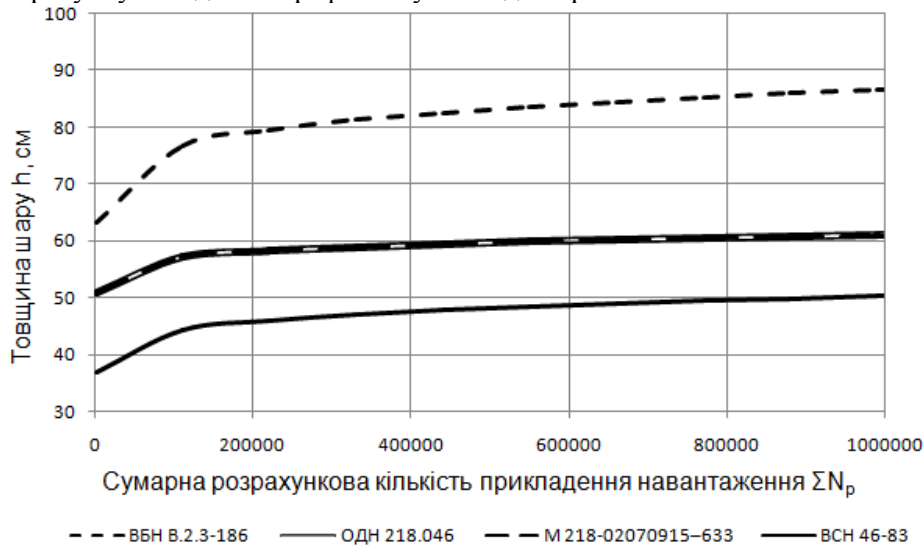


Рисунок 1 – Залежність загальної товщини конструкції дорожнього одягу h_Σ від інтенсивності прикладення навантаження ΣN_p при заданому коефіцієнті запасу міцності K_M

Аналіз розглянутих методик (рис. 1) вказує на подібний характер кривих зміни загальної товщини h_Σ шарів дорожнього одягу при збільшенні кількості циклів прикладення навантаження на КДО. Різниця в товщині дорожнього одягу нівелюється приведенням розрахунків за методиками [5-8] до єдиного коефіцієнту запасу міцності K_M .

На основі методики ВСН 46-83 [8] та за алгоритмом наведеному роботі [9, 10] отримана залежність, що пов’язує коефіцієнт варіації активного напруження зсуву $C_{акт}$ з коефіцієнтами варіації товщини шару C_h , середнього модуля пружності шарів дорожнього одягу $C_{Еср}$, модуля пружності ґрунтового напівпростору $C_{Егр}$, а також кута внутрішнього тертя C_φ :

$$C_{ТАКТ} = \sqrt{\left(\frac{C_\varphi}{93}\right)^2 \cdot C_\varphi^2 + \frac{C_h^2}{\left[\frac{20}{27} \left(\frac{D}{h_\Sigma}\right) \cdot \left(\frac{E_{гр}}{E_{ср}}\right)\right]^2} + \frac{C_{Еср}^2 + C_{Егр}^2}{\left[\frac{20}{27} \left(\frac{D}{h_\Sigma}\right) \cdot \left(\frac{E_{гр}}{E_{ср}}\right) + \frac{1}{2}\right]^2}} \quad (5)$$

Орієнтовні значення коефіцієнтів варіації параметрів, що впливають на розрахунок неоднорідності за критерієм зсуву за результатами власних досліджень та узагальнення наявних даних наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Орієнтовні значення коефіцієнтів варіації параметрів

Назва параметру	Мінімальне значення коеф. варіації, C_i	Середнє значення коеф. варіації, C_i	Максимальне значення коеф. варіації, C_i
Модуль пружності ґрунту $E_{гр}$	0,20	0,25	0,30
Кута внутрішнього тертя φ	0,12	0,14	0,16
Питомого зчеплення C	0,12	0,15	0,18
Середнього модуля пружності E_c	0,15	0,20	0,25
Тиску в пневматику P	0,05	0,07	0,10
Кількості циклів навантаження N	0,18	0,20	0,25
Товщини дорожнього одягу h	0,05	0,07	0,09

Аналіз впливу коефіцієнтів варіації товщини шару C_h та модуля пружності ґрунтового напівпростору $C_{E_{гр}}$ на коефіцієнт варіації активного опору зсуву $C_{\tau_{акт}}$ наведено на рис.2.

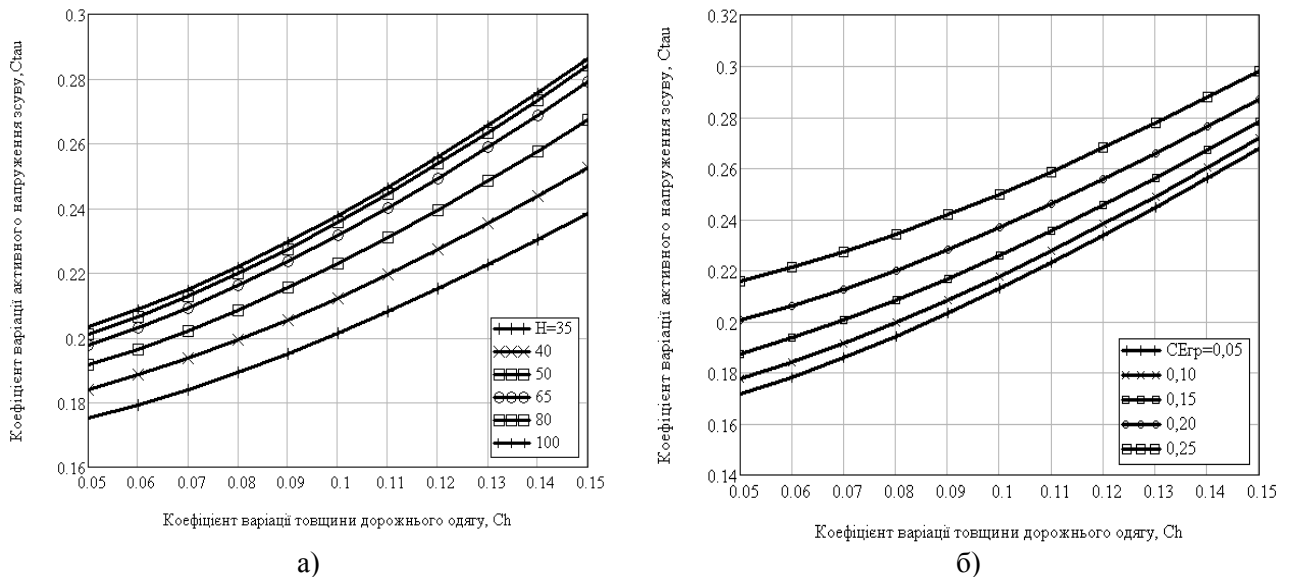


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнту варіації активного напруження зсуву C_{τ} від коефіцієнта варіації товщини дорожнього одягу C_h при різних значеннях: а) його товщини h та при $C_{\varphi}=0,10$ $C_{E_c}=0,12$, $C_{E_{гр}}=0,20$; б) коефіцієнта варіації модуля пружності ґрунту $C_{E_{гр}}$ та при $C_{\varphi}=0,15$ $C_{E_c}=0,12$, $h=0,60$ м

Коефіцієнт варіації допустимого напруження зсуву $C_{\tau_{дон}}$:

$$C_{\tau_{дон}} = \frac{C \cdot k_1 \cdot k_d}{\tau_{дон} \cdot \ln(10)} \times \sqrt{(0.1176 \cdot C_c^2 \cdot \ln(N_p))^2 - 2.869 \cdot C_c^2 \cdot \ln(N_p) + 17.48 \cdot C_c^2 + 0.118 \cdot C_{N_p}^2} \quad (6)$$

де C_c , C_{N_p} – коефіцієнти варіації зчеплення в ґрунті земляного полотна та відповідно інтенсивності прикладення навантаження на КДО.

Результати розрахунків надійності КДО нежорсткого типу по критерію граничного стану за умовою зсувостійкості земляного полотна за формулами (1-6) графічно побудовано на рис. 3 та зведено в табл. 4.

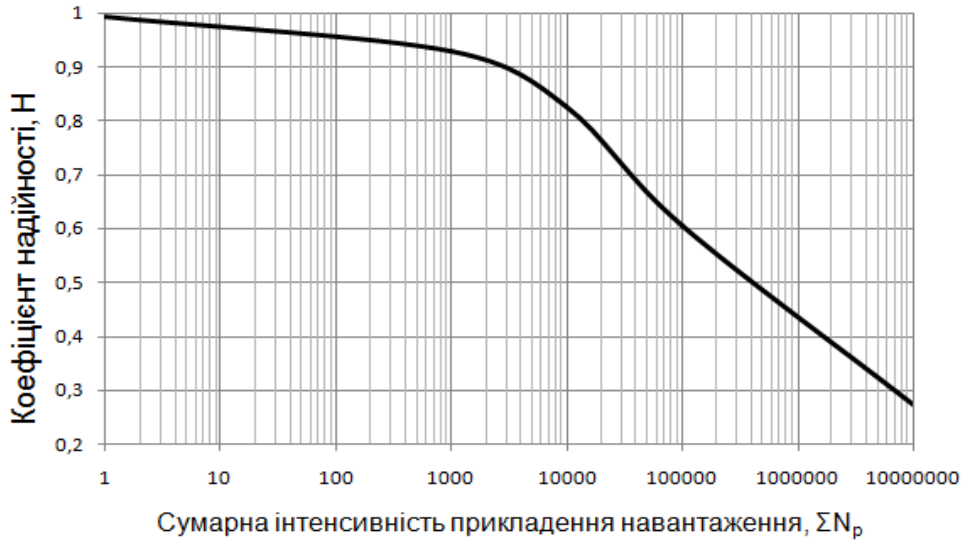
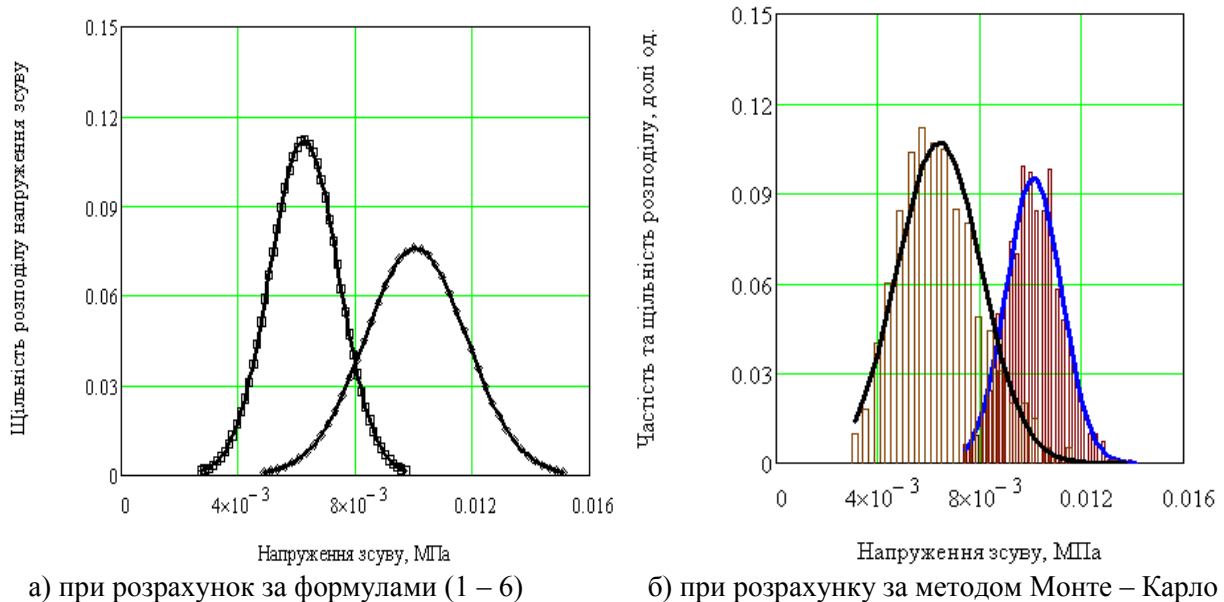


Рисунок 3 – Зміна коефіцієнту надійності від сумарної інтенсивності руху для нормальних законів розподілу $\tau_{доп}$ та $\tau_{акт}$

Таблиця 4 – Результати розрахунку надійності КДО нежорсткого типу

Сумарна інтенсивність руху, осей/строк експлуатації	1	10^3	10^4	10^5	10^6
Коефіцієнт надійності, H для нормальних законів розподілу $\tau_{доп}$ та $\tau_{акт}$	0,9938	0,9296	0,8273	0,605	0,273
Ймовірність відмови, P	0,0062	0,0704	0,1727	0,395	0,727

Порівняння щільності розподілу активного та допустимого напруження зсуву розрахованого за наведеним вище теоретичним методом (1-6) та методом Монте – Карло згідно [11] наведено на рис. 4.



а) при розрахунок за формулами (1 – 6)

б) при розрахунок за методом Монте – Карло

Рисунок 4 – Порівняння щільності розподілу активного та допустимого напруження зсуву

Висновки

- Теоретично встановлено можливість застосування основних положень класичної теорії надійності при проектуванні конструкцій нежорстких дорожніх одягів за критерієм зсуву у ґрунті. Встановлено основні закономірності для розрахунку неоднорідності конструкцій дорожніх одягів за даним

критерієм граничного стану.

- Для аналізу загальної неоднорідності конструкцій дорожнього одягу використано два методи: теоретичний (метод лінеаризації) і метод статистичних випробувань (Монте-Карло).
- У статистичній постановці отримано залежності для розрахунку розкиду зсуваючих напружень S_z використанням відомих формул Б.С. Радовського та М.Б. Корсунського.
- Для відомих законів зміни щільності розподілу вхідних параметрів використаний метод статистичного моделювання (Монте-Карло).
- За допомогою отриманих залежностей побудовано номограми для розрахунку коефіцієнта варіації активних та допустимих зсуваючих напружень:
- Отримані формули є теоретичною основою для розрахунку однорідності та надійності двошарових та багатошарових систем за критерієм міцності зсув у ґрунті чи незв'язних шарах КДО.

Використана література

1. Сиденко В. М. Расчет и регулирование водно-теплого режима дорожных одежд и земляного полотна / В. М. Сиденко. – М.: Автотрансиздат, 1962. – 116 с.
2. Дмитриченко М. Ф., Дмитрієв М. М., Гамеляк І. П., Райковський В. Ф., Якименко Я. М. Надійність конструкцій дорожнього одягу / М. Ф. Дмитриченко, М. М. Дмитрієв, І. П. Гамеляк, В. Ф. Райковський, Я. М. Якименко // Навч. посібник. – К.: НТУ. – 2012. – 206 с.
3. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон // М.: Мир. – 1980.
4. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А. Р. Ржаницын // М.: Стройиздат., 1978. – 239 с.
5. ВБН В.2.3-218-186-2004 Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу. Укравтодор Київ 2004.
6. М 218-02070915-633:2007 Методика проектування дорожнього одягу з конструкціями різного типу. Укравтодор. Київ, 2007.
7. ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд. Государственная служба дорожного хозяйства Министерства транспорта Российской Федерации. Москва, 2001.
8. ВСН 46-83 Инструкции по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. Министерство транспортного строительства СССР. Москва, 1985.
9. Гамеляк І. П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.11 / Гамеляк Ігор Павлович. – К., 2005. – 460 с.
10. Гамеляк І. П., Лаптева Н. С. Неоднорідність дорожнього одягу за критерієм зсуву в ґрунті земляного полотна // Автомоб. дороги і дор. буд-во. К., 1997. – Вип.54. – С. 85-91.
11. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике / С. М. Ермаков. – Вводный курс. Санкт-Петербург.: – 2009. – 192 с.

Гамеляк І. П. – доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна.

Волощук Д. В. – Національний транспортний університет, Київ, Україна.

Гамеляк И. П. – доктор технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина

Волощук Д. В. – Национальный транспортный университет, Киев, Украина.

Gameliak I. – doctor of technical sciences, National Transport University, Kyiv, Ukraine

Voloshchuk D. – National Transport University, Kyiv, Ukraine.