

**ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОГО МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ НЕЖЕРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО
ОДЯГУ
DETERMINATION OF THE DESIRED MODULUS OF ELASTICITY OF NON-RIGID ROAD
CLOTHING**



Гамеляк Ігор Павлович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри системного проектування об'єктів транспортної інфраструктури, Київ, Україна, e-mail: gip65n@gmail.com., +380503524124, <https://orcid.org/0000-0001-9246-7561>



Дмитриченко Андрій Миколайович, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, доцент кафедри транспортного права та логістики, e-mail: andrew_d@ukr.net, +380502816006, <https://orcid.org/0000-0001-6144-7533>



Райковський Віталій Францевич, кандидат технічних наук, завідувач сектору науково-технічного супроводу ДП "ДерждорНДІ" Київ, Україна, e-mail: vintikntu@ukr.net, тел. +380982846899, <https://orcid.org/0000-0002-6391-7647>

Анотація: У роботі розглянуто питання визначення потрібного модуля пружності нежорсткого дорожнього одягу при дії сучасних транспортних засобів в залежності від величини загальної маси, тиску в шинах кількості осей та впливу зближених осей транспортних засобів. В основі розрахунків лежить методика приведення автотранспортного засобу до нормативного навантаження на вісь розрахункової осі групи A_2 (115 кН) та A_3 (100 кН).

Ключові слова: загальний модуль пружності, потрібний модуль пружності, дорожній одяг, допустима маса, зближені осі, критерії розрахунку, нормативне навантаження на вісь транспортний засіб, тиск у шині, деформації.

Вступ. В останні десятиліття у зв'язку із збільшенням об'ємів перевезень, підвищенням вантажності головний вплив на строк служби дорожнього одягу спричинюють важкі та понаднормативні автотранспортні засоби. Це підтверджується як досвідом служби автомобільних доріг, так і прямими експериментами.

Дія автотранспортних засобів на дорожній одяг залежить від таких факторів [1 – 4 та ін.]:

- 1) величини навантаження на вісь чи колесо;
- 2) міжосьової відстані;
- 3) кількості коліс в осі і відстані між ними;
- 4) тиску повітря в шині та її типу;

- 5) типу підвіски;
- 6) швидкості руху;
- 7) конструкції дорожнього одягу, властивостей і стану шарів та ґрунту;
- 8) степені нерівності та шорсткості покриття;
- 9) кількості проїздів (інтенсивності руху) тощо.

Вплив цих факторів переплітається: динамічне навантаження, нормальне до поверхні покриття, зростає із збільшенням швидкості руху і степені нерівності, а дотичне навантаження може зростати при збільшенні шорсткості поверхні покриття тощо.

Існуючий підхід до оцінювання руйнівного впливу ТЗ на нежорсткий дорожній одяг полягає у тому, що до уваги приймається лише розрахунок у весняний період максимального послаблення конструкції дорожнього одягу, оскільки вважається, що саме в цей короткий період конструкцією накопичується до 80 % обсягу річних пошкоджень. Таке тлумачення не є безперечним. Інтенсивність накопичення пошкоджень залежить від багатьох факторів, основними з яких є капітальність конструкції дорожнього одягу, сезонні зміни фізико-механічних властивостей матеріалів шарів, параметри навантаження, а також кількість пошкоджень, які були накопичені конструкцією за попередній строк служби.

Матеріали та методи. Методологічною основою виступає науковий підхід до аналізу питань дослідження шляхом використання статистичного, формально-логічного, та комплексного методів дослідження. Джерелами дослідження є дані з пунктів автоматичного зважування транспортних засобів WIM та чинних нормативних документів

Метою роботи є удосконалення методики визначення потрібного модуля пружності нежорсткого дорожнього одягу.

Виклад основного матеріалу.

Розрахунок конструкції нежорсткого дорожнього одягу полягає у визначенні необхідної товщини шарів у варіантах конструкції дорожнього одягу, розроблених на етапі конструювання. Розрахунок конструкції нежорсткого дорожнього одягу виконується за несною здатністю, деформаціями та тріщиностійкістю: пружним прогином (загальним модулем пружності), зсувом в ґрунті і міцністю на розтяг при згині згідно з ГБН В.2.3-37641918-559 [5].

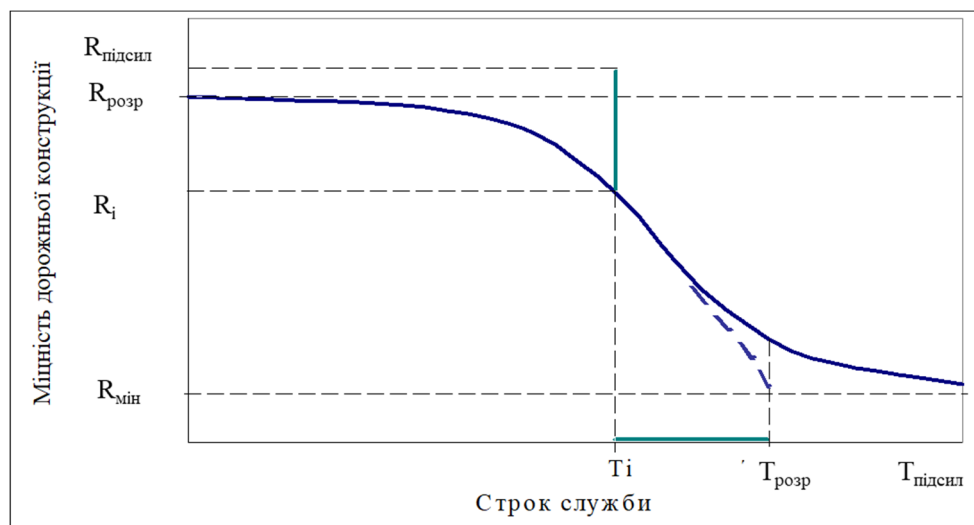


Рисунок 1 – Зменшення міцності дорожньої конструкції за строком служби
Figure 1 - Decrease in pavement strength over the service life

Розрахунок за критерієм несної здатності полягає в забезпеченні та збереженні міцності конструкції дорожнього одягу (рисунок 1), тобто її спроможності протистояти руйнуванню, а саме для шарів із зв'язних матеріалів (асфальтобетон, укріплені щебенево-піщані суміші, тощо) руйнуванням – утворення тріщин. Тому такі шари розраховуються на розтяг при згині ($R_{мін}$, $R_{розр}$, $R_{підсил}$) (рисунок 1). Для ґрунту земляного полотна руйнуванням є незворотний зсув, тому ґрунт розраховується на стійкість проти зсуву за найбільш небезпечною площиною.

Одним із завдань розрахунку конструкції дорожнього одягу є недопущення накопичування значних вертикальних переміщень покриття, які призводять до утворення поздовжніх та поперечних нерівностей (хвилі і колії). Тому пружний прогин характеризує накопичення залишкових переміщень і конструкцію дорожнього одягу розраховують за критерієм пружного прогину на поверхні покриття.

Таким чином, конструкцію нежорсткого дорожнього одягу розраховують за трьома критеріями граничного стану: на розтяг при згині асфальтобетонних шарів і шарів із укріплених щебеневих матеріалів, на зсув у ґрунті земляного полотна, на пружний прогин шару покриття. Розрахунок конструкції дорожнього одягу на міцність проводиться, виходячи з перспективної інтенсивності руху автомобілів для умов весняного розрахункового періоду. Допустимий граничний стан приймається таким, щоб конструкція дорожнього одягу могла працювати без пошкоджень з заданою надійністю протягом розрахункового строку служби.

Приведення інтенсивності транспортного потоку до розрахункового навантаження базується на теорії еквівалентності напружено-деформованого стану (дані – НДС) конструкції дорожнього одягу при дії розрахункового навантаження.

Кожному з критеріїв розрахунку дорожнього одягу на міцність відповідає гранично допустима кількість прикладання розрахункового навантаження протягом строку служби між капітальними ремонтами.

Критерій загального модуля пружності. Розрахунок міцності конструкції дорожнього одягу за критерієм загального модуля пружності проводиться для умов температури поверхні покриття $t_{пов} = +10^\circ\text{C}$ і весняного розмороження ґрунтів.

Приведена добова інтенсивність руху розрахункового навантаження (од./добу) для конструкції з загальним модулем пружності $E_{заг}$ визначається за формулою [6].

$$N_p^* = 10^{\frac{1}{a} \left(\frac{E_{заг}}{K_{міц}} - b_{(A,B)} \right)}, \quad (1)$$

де $K_{міц}$ – коефіцієнт міцності конструкції дорожнього одягу;

a і b – коефіцієнти ($a=70$ МПа; $b_{A2}=56$ МПа і $b_B=0$ МПа для навантажень груп А₂ і А₃ відповідно).

Конструкція дорожнього одягу відповідає вимогам надійності і міцності за критерієм пружного прогину, якщо виконується умова

$$K_{міц} \leq \frac{E_{заг}}{E_{пот}}, \quad (2)$$

$E_{заг}$ – загальний модуль пружності конструкції, МПа;

$E_{пот}$ – потрібний модуль пружності конструкції, визначається з урахуванням капітальності дорожнього одягу та інтенсивності дії навантаження, МПа (рис. 1).

$$E_{пот} = 42,843 \cdot \ln(\sum N_p) - b, \quad (3)$$

b – коефіцієнт, величина якого приймається залежно від групи навантаження відповідно до ДБН В.2.3-4; для групи А₂ $b = 315,68$; для групи А₃ $b = 350,21$; для групи В $b = 409,40$;

$$\sum N_p = 365 \cdot \sum_{i=1}^k \left(S_i \cdot N_i \cdot \left(\frac{(1+\beta)^T - 1}{\beta} \right) \right) \cdot f_{смуги}, \quad (4)$$

де k — приймають згідно з розрахунковою колісною схемою

β — відсоток приросту комерційних транспортних засобів, приймають за даними багаторічних спостережень.

На рис. 1 додатково враховано необхідність забезпечення мінімального потрібного модуля пружності із умови проїзду понаднормативних транспортних засобів низької інтенсивності руху

З урахуванням (2) та (3) сумарне граничне значення інтенсивності руху за строк служби за критерієм загального модуля пружності буде

$$\sum N = e^{\frac{1}{42,843} \left(\frac{E_{заг}}{K_{міц}} - b_{(A2,A3,B)} \right)}, \quad (5)$$

Розрахунок допустимих зсувних зусиль в ґрунті земляного полотна визначається за формулами.

$$\tau_{don} \geq K_{миц} \cdot \tau, \quad (6)$$

$$\tau_{don} = C_{zp} k_1 k_2 k_3, \quad (7)$$

де τ – активне напруження в ґрунті від дії короткочасного навантаження;

C_{zp} – коефіцієнт зчеплення у ґрунті;

k_1 – коефіцієнт, який враховує агресивну дію повторних короткочасних навантажень, $k_1=0,6$;

k_2 – коефіцієнт запасу, який враховує повторну дію навантажень і залежить від інтенсивності руху розрахункових автомобілів, може бути описаний залежністю

$$k_2 = 2,45 \cdot N_p^{-1/6}, \quad (8)$$

k_3 – коефіцієнт, який враховує умови роботи ґрунту.

Із залежностей (6 – 8) допустима приведена добова інтенсивність руху розрахункових навантажень (од./добу) для конструкції за критерієм зсуву τ розраховується за формулою [6].

$$N_{p\tau}^* = \left(2,45 \frac{k_1 k_3}{K_{миц}} \cdot \frac{C_{zp}}{\tau} \right)^6. \quad (9)$$

Тоді, з урахуванням (4) сумарне граничне значення інтенсивності руху за строк служби за критерієм зсуву в ґрунті буде

$$\Sigma N = 365 \cdot N_i \cdot \left[\frac{(1 + \beta)^{(T)} - 1}{\beta} \right] \left(2,45 \frac{k_1 k_3}{K_{миц}} \cdot \frac{C_{zp}}{\tau} \right)^6; \quad (10)$$

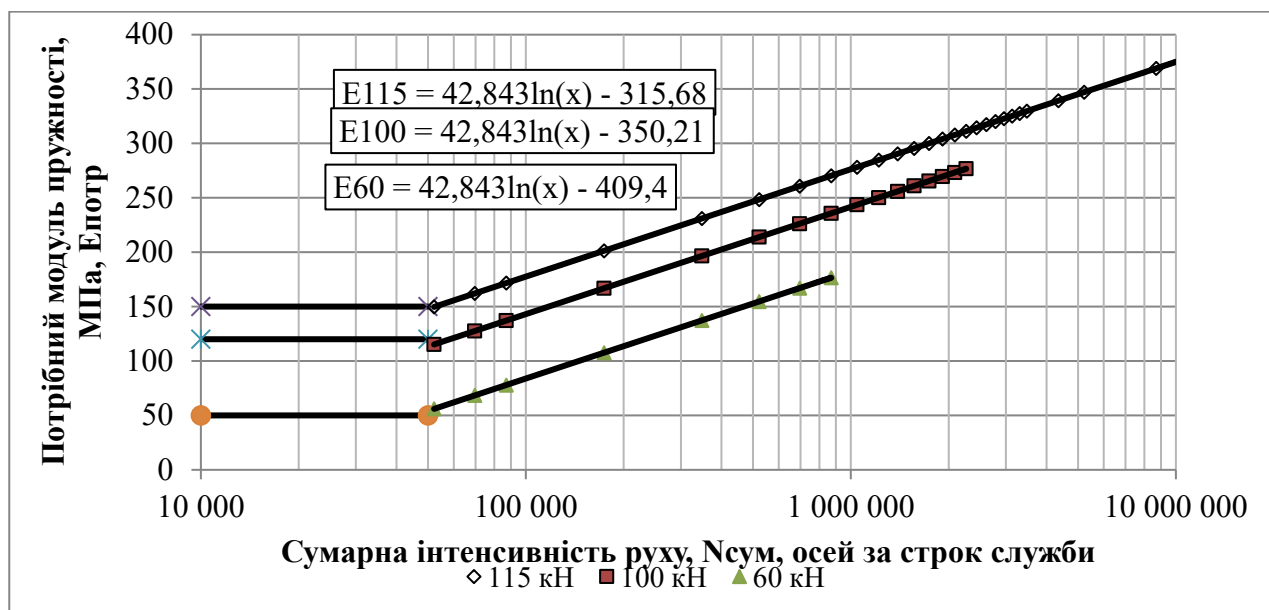


Рисунок 2 – Зміна потрібного модуля пружності в залежності від сумарної інтенсивності руху
Figure 2 – Change of the desired modulus of elasticity depending on the total intensity of movement

За умови допустимого розтягу при згині монолітних шарів нежорсткого дорожнього одягу можна встановити залежність для допустимої інтенсивності руху розрахункових навантажень (од./добу), виходячи з накопичення пошкоджень при втомі за формулою [6]:

$$N_{p.зг}^* = \frac{k_B^n \cdot \beta_{non}}{365 \cdot T_{cl}} (1 - t_\alpha C_r)^n, \quad (11)$$

де k_B – коефіцієнт запасу міцності на втому (7)

$$k_B = \frac{R_{\Sigma}}{\sigma_{\Sigma}}, \quad (12)$$

σ_{Σ} – амплітудне напруження розтягу в шарі товщиною H_1 ;
 n – параметр, який характеризує опір матеріалу руйнуванню від втоми при циклічному навантаженні;
 β_{non} – коефіцієнт поперечного приведення проїздів, розподілених по ширині за нормальним законом;

$$\beta_{non} = \pi k S_N \sqrt{n}, \quad (13)$$

$$k = \frac{2}{D\sqrt{\pi}} \operatorname{arctg} \left(\frac{D}{2H_1} \sqrt[3]{\frac{6E_2(1-\nu_1^2)}{E_1(1-\nu_2^2)}} \right), \quad (14)$$

T_{cl} – строк служби, років;
 t_{α} – коефіцієнт нормованого відхилення, який приймається залежно від проектного рівня надійності;
 C_r – коефіцієнт варіації міцності;
 S_N – середньоквадратичне відхилення положення центра відбитку колеса від його середнього положення, см;
 k – параметр двошарової конструкції (згідно з М.Б. Корсунським);
 D – діаметр круга, рівновеликого по площі відбитку колеса;
 ν_1, ν_2 і E_1, E_2 – відповідно коефіцієнти поперечної деформації і модулі пружності матеріалів монолітного шару покриття та напівпростору.

Залежності (1), (5) і (6) дозволяють встановити допустиму приведену до розрахункового навантаження інтенсивність руху по кожному з розрахункових критеріїв міцності дорожнього одягу з заданим рівнем надійності.

Розрахунок НДС конструкції дорожнього одягу залежить від наступних параметрів:

- міцності та деформативних характеристик конструктивних шарів дорожнього одягу та робочого шару ґрунту земляного полотна, які в свою чергу залежать від зміни температури, вологості, а також степеню руйнування конструкції дорожнього одягу;
- швидкості руху ТЗ;
- параметрів впливу ТЗ (тиску повітря в шинах, площі контакту колеса з покриттям, діаметру відбитку колеса, навантаженню на колесо, міжосьової відстані).

Величина коефіцієнта приведення навантаження на вісь до еквівалентного розрахункового навантаження, змінюється залежно від:

- критерію граничного стану конструкції дорожнього одягу;
- сезону року;
- степеню руйнування конструкції дорожнього одягу.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що з підвищенням капітальності конструкції дорожнього одягу (тобто його жорсткості) взаємний вплив коліс на прогин покриття зростає.

У процесі циклічного навантаження ТЗ на дорожній одяг відбувається руйнування покриття, що проявляється в зменшенні загальної жорсткості конструкції. При цьому взаємний вплив суміжних коліс зменшується від зниження розподільчої здатності конструкції дорожнього одягу, а напруження та прогини зростають, відбувається поступове накопичення пошкоджень і зміна НДС конструкції.

Сумарний коефіцієнт приведення дії автотранспортного засобу до розрахункового навантаження на колесо з врахуванням всіх розглянутих факторів визначаються за формулою [7].

$$S_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{Q_i^e}{Q_p} \right)^{4,4}. \quad (15)$$

Наприклад, з формули (14) слідує, що при інших рівних умовах підвищення середнього тиску коліс на покриття від $p_i=0,5$ МПа до $p_j=0,6$ МПа рівноцінно підвищенню навантаження у $f_j=(0,6/0,5)^{1/3}=1,06$ рази.

Вплив тиску повітря в шині та типу підвіски

Із збільшенням тиску повітря в шині зростає її тиск на контакт з покриттям, площа відбитку колеса зменшується, тобто навантаження на покриття стає більш концентрованим. Внаслідок цього зростає напруження в дорожньому одязі. Характерно, що в останні роки власники вантажних автомобілів за кордоном прагнуть підвищити тиск повітря в шинах автомобілів, оскільки при цьому зменшуються гістерезисні витрати при коченні колеса.

За даними С.К. Кларка (відділ прикладної механіки Мічиганського університету в США) [8], гістерезисні втрати досягають 90 % опору коченню пневматичних шин (останні 10 % припадають на аеродинамічний опір, втрати в трансмісії, втрати від неефективного режиму руху та витрати потужності на прискорення).

Вважають, що опір коченню лінійно залежить від величини, оберненої до тиску повітря в шині:

$$\frac{F_r}{F_{ro}} = \frac{F_z}{F_{zo}} \left[1 + C_p \left(\frac{p_o}{p} - 1 \right) \right], \quad (16)$$

де F_r, F_z - опір коченню та вертикальне навантаження на шину;

F_{ro}, F_{zo} - те ж для деякої шини, що приймається за еталонну;

p, p_o - тиск повітря в шині;

C_p - коефіцієнт, що визначається експериментально при деяких значеннях F_z і p для будь якої шини шляхом порівняння з опором коченню еталонної, після чого для других навантажень та внутрішніх тисків використовують формулу (12).

Для шини 8.75R - 16.5 при барабані діаметром 67 дюймів значення $C_p=0,325$.

Тому для оцінки зменшення опору коченню за рахунок підвищення тиску повітря в шині від p_o до p можна використовувати наближену формулу

$$\frac{F_r}{F_{ro}} = \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \left(\frac{p_o}{p} \right). \quad (17)$$

Обстеження, проведене в шт. Техас [9], показало, що замість нормативного тиску $p_o=0,517$ МПа, який приймається при розрахунках дорожніх одягів, фактичний тиск повітря в шинах 85 % вантажних автомобілів складає не менше $p=0,862$ МПа. З формули (17) слідує, що при цьому

$$\frac{F_r}{F_{ro}} = \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \left(\frac{0,517}{0,862} \right) = 0,866,$$

тобто при збільшенні тиску повітря в шині у 1,67 рази опір коченню зменшується на 13,4 %, або витрати пального - приблизно на 12 %.

Проте збільшення тиску несприятливо позначається на довговічності дорожнього одягу, хоча він по різному впливає на напружено-деформований стан різних шарів.

Розрахунки показують, що внаслідок розподіляючої дії дорожнього одягу при сильно відмінному тиску колеса на покриття (але постійному навантаженні) напруження в ґрунті мало відрізняється одне від одного. Так, для обчислення максимального активного напруження зсуву в ґрунті на поверхні земляного полотна може бути використана формула [7]:

$$\tau_n \approx 0,218 \frac{Q^{0,9} p^{0,1} (1 - \sin \varphi)}{H^{1,8} \left(\frac{E_{cp}}{E_{zp}} \right)^{0,5} \cos \varphi}, \quad (18)$$

де Q - вертикальне навантаження від колеса на покриття;
 p - середній тиск на покриття;
 E_{sp} - модуль пружності ґрунту земляного полотна;
 φ - кут внутрішнього тертя ґрунту.

З цієї формули слідує, що активне напруження зсуву в ґрунті τ_n залежить від навантаження на покриття майже лінійно (показник степеня в формулі (14) $\alpha=0,9$), а від тиску повітря в шинах зовсім слабо: із збільшенням тиску в 2 рази τ_n збільшується лише на 7 %.

Малий вплив зміни тиску (при постійному навантаженні) на напруження під дорожнім одягом відповідає відомому в будівельній механіці принципу Сен-Венана, згідно з яким напружений стан в точках, достатньо віддалених від місць прикладання навантаження, залежить не від характеру її розподілу по граничній площині, а від величини та напрямку рівнодіючого навантаження.

Але, мало впливаючи на напружений стан ґрунту земляного полотна, підвищення тиску повинно приводити до більш помітного збільшення напружень в дорожньому покритті.

Дійсно, вимірювання повздовжньої горизонтальної відносної деформації стиску при згині асфальтобетонного покриття товщиною 10 см (2 шари по 5 см) при навантаженні 4 кН і температурі 6°C дали для тиску повітря в шині $p=0,2$ МПа і 0,4 МПа при швидкості 20 км/год відносні деформації - $37 \cdot 10^{-6}$ і - $39 \cdot 10^{-6}$, тобто із збільшенням тиску вдвоє відносна деформація згину збільшилась на 5,4 %.

За даними Х. Зібеля та С. Ленкера, узагальненими Й. Айзенманном [10] при загальній товщині бітумінеральних шарів 22 см збільшення тиску від 0,6 до 0,7 МПа призводить до зменшення числа проїздів осей до капітального ремонту на 15 %; збільшення тиску від 0,7 до 0,9 МПа при постійному навантаженні Й. Айзенманн вважає рівноцінним збільшенню навантаження на 10 % при цьому строк служби зменшується в 1,5 рази.

Експериментально визначивши характер розподілу тиску в контактній нерухомого та рухомого колеса з поверхнею покриття [11], та, виконавши розрахунки на основі рішення теорії пружності для шарового напівпростору [12], співробітники університету в шт. Техас прийшли до висновку, що збільшення тиску повітря в шині від 0,517 МПа (нормативний тиск при розрахунках дорожніх одягів) до 0,862 МПа (фактичний тиск повітря в шинах 85 % вантажних автомобілів у шт. Техас) призводить до збільшення відносної деформації згину асфальтобетонного покриття товщиною 2,5 см на 20-30 %, а товщиною 10 см - на 10 %. Крім того, в роботі [13] відмічено, що загальноприйняте припущення про рівномірність розподілу нормального тиску по площі відбитку приводить до заниження відносної деформації покриття приблизно в 2 рази в порівнянні з його відносною деформацією при його фактично нерівномірному розподілі.

Вплив типу шин та тиску повітря в них взаємозв'язані. Зокрема, в останні роки набули поширення пневматична підвіска та радіальні шини. Радіальні шини мають менший тиск повітря, ніж діагональні, більший строк служби і меншу вертикальну жорсткість, що позитивно впливає на термін служби дорожнього покриття, але їх експлуатують при більш високих тисках повітря.

Вплив типу підвіски здвоєних та строєних осей на довговічність дорожніх покриттів вивчався у роботі [6]. Вирахувавши горизонтальне відносне видовження в покритті, на основі гіпотези Майнера про сумування пошкоджень від втоми оцінювали вплив динамічного навантаження на строк служби. Із п'яти типів підвіски найбільш несприятливою виявилась вільно-балкова, а найбільш сприятливими - торсіонна та чотирирична. Констатувалось, що найбільший вплив на амплітуду коливань динамічної частини навантаження спричинює власна частота коливань системи автомобіль-підвіска. Якщо модальні частоти, що викликаються нерівностями покриття, наближуються до власної частоти коливань підвіски, то динамічна частина навантаження, що передається колесом на дорожнє покриття, зростає.

Вплив числа коліс і відстані між ними

Вплив автомобіля на дорожній одяг залежить не лише від осьових навантажень, кількості осей і їх розміщення, але і від кількості коліс в осі. Так, при рівних навантаженнях на покриття вертикальні напруження на поверхнях основи і земляного полотна у випадку здвоєних шин, центри відбитків яких знаходяться на звичайній відстані 32-38 см один від одного, в середньому на 20-25% менші, ніж у випадку одиночної шини.

Так, за даними П. Зібеля і Й. Айзенманна, при відстані 350 мм між центрами відбитків застосування спарених шин замість одинарної зменшує вплив на асфальтобетонне покриття на 24 % або дозволяє підвищити число проїздів до руйнування приблизно у 2,6 рази. Якщо ж врахувати

нерівномірність тиску в шинах обох коліс і нерівності на поверхні покриття, особливо при проїзді на кривій, то замість коефіцієнта 0,76 можна прийняти 0,90, тобто вважати, що вісь зі спареними шинами на дорогу діє так само, як і вісь з одинарними шинами і осьовим навантаженням, зменшеним на 10%.

В інструкції ГБН В.2.3-37641918-559:2019 та Довіднику № 1 [14, 15] (формула (1.17)) прийнято згідно даних понижуючий коефіцієнт 0,85, що враховує зменшення розтягуючого напруження під колесом зі спареними балонами.

Цей ефект є ще більш суттєвим при великих навантаженнях і значних відстанях між здвоєними шинами, оскільки використання спарених балонів дозволяє розподілити колісне навантаження по поверхні покриття. Так, дані випробувань одиночних і спарених коліс великовантажних транспортних засобів показали, що при однаковому колісному навантаженні прогини поверхні покриття і вертикальні нормальні напруження на поверхні ґрунту під одиночним колесом в середньому відповідно у 1,6-1,7 і 1,4-1,5 рази більші, ніж під кожним із балонів спареного колеса. Це значить, що допустиме навантаження на вісь зі спареними колесами може бути підвищене на 40-50 % у порівнянні з допустимим навантаженням на вісь з одинарними колесами без погіршення умов роботи дорожнього одягу.

В цих експериментах колісне навантаження змінювали в межах від 25 до 125 кН, тиск повітря в шинах спеціально задавали однаковим і рівним 0,50 МПа. Разом з тим, у великовантажних транспортних засобів, що використовувались у ході випробувань, балони спарених коліс були розміщені відносно далеко одне від одного - на відстані $l=90$ см, при відносній відстані $l/D=2,5...4,0$, де D - діаметр кола, рівновеликого відтиску кожного з балонів. У транспортних засобів групи А типу ця відстань набагато менша $l/D=1,2...1,9$. Очевидно саме тому тиск на ґрунт від дії їх одиночних і спарених балонів (при однаковому навантаженні) практично однаковий, що відповідає принципу Сен-Венана.

Ефект спареності проявляється тим сильніше, чим менша товщина і жорсткість шарів дорожнього одягу.

Щоб врахувати сумісний вплив на напружений стан дорожнього одягу групи близько розміщених коліс, вплив цієї групи замінюють еквівалентним йому впливом одного одиночного колеса.

Для аеродромних покриттів, на які діє багатокісна опора літака, використовують метод корпусу армійських інженерів США (метод ІКАО).

Великий вплив на еквівалентне колісне навантаження спричиняє вибір параметра еквівалентності: прогин покриття, розтягуюче напруження чи деформація покриття, вертикальні напруження і деформація стиску в ґрунті [7, 16 - 17].

Дію на дорожній одяг навантаження від i -го колеса, що рухається від багатокісного транспортного засобу, слід визначати з урахуванням впливу на напружено-деформований стан дорожнього одягу як даного колеса з навантаженням Q_{oi} , так і інших близько розташованих коліс, і характеризувати еквівалентним колісним навантаженням Q_{oie} , яка визначається за формулою [7]:

$$Q_{oi}^E = k_D \cdot \left\{ \sum_{j=1}^M Q_j \cdot g(L_{i,j}/D_{oi}) \cdot q(l_{i,j}/D_{oi}) \right\}, \quad (19)$$

де, k_D - як і раніше, коефіцієнт динамічності;

Q_i, Q_j - статичні навантаження на i - те і j - те колесо групи;

M - загальна кількість коліс у групі;

D_{oj} - діаметр кола, рівновеликого відбитку рухомого j - того колеса з навантаженням на нього Q_j , що визначається за формулою (15);

L_{ij} - відстань між центрами відбитків i -го і j -го колеса поздовжньому напрямку (у напрямку руху);

l_{ij} - відстань між центрами відбитків i - го і j - го колеса поперечному напрямі;

$g_j(L_{i,j}/D_{oi})$ - функція, що характеризує вплив j - того колеса на напружено -деформований стан дорожнього одягу під i - тим колесом в поздовжньому напрямі;

$q(l_{i,j}/D_{oi})$ - функція, що характеризує вплив j - того колеса на напружено - деформований стан дорожнього одягу під i - тим колесом в поперечному напрямі: визначається за рис. 3 або формулою [7]:

$$q(l_{ij}/D_{oj}) = B_1 \cdot e^{-d_1 \times k_p \times (l_{ij}/D_{oj})^2} + B_2 \cdot e^{-d_2 \times k_p \times (l_{ij}/D_{oj})^2} \quad (19)$$

де, B_1, B_2, d_1 і d_2 - коефіцієнти, значення яких наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Значення коефіцієнтів для обчислення функції $q(x)$
Table 1 - Values of coefficients for calculating the function $q(x)$

Капітальність дорожнього одягу	Коефіцієнти			
	B_1	B_2	d_1	d_2
Капітальний, полегшений	0,40	0,60	0,065	0,44
Перехідний	0,33	0,67	0,080	0,53

При однакових навантаженнях Q на колесо в групі з M коліс формулу (19) зручно записати у простішому вигляді:

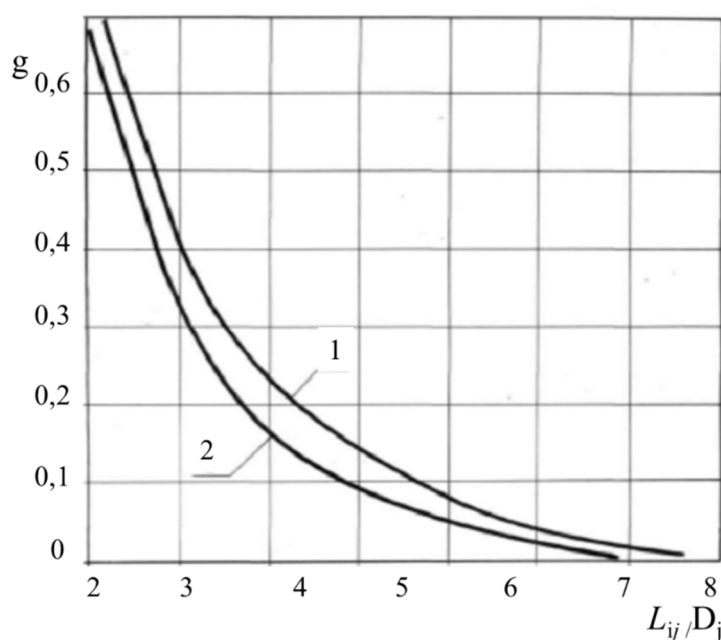
$$Q_{\delta i}^E = k_{\delta} \cdot Q \cdot c_g \cdot c_q \quad (21)$$

де g_c - сума, що характеризує, як і в формулі (2.22), вплив коліс групи в поздовжньому напрямку і визначається формулою (22);

q_c - сума, що характеризує вплив коліс групи в поперечному напрямку і визначається за формулою:

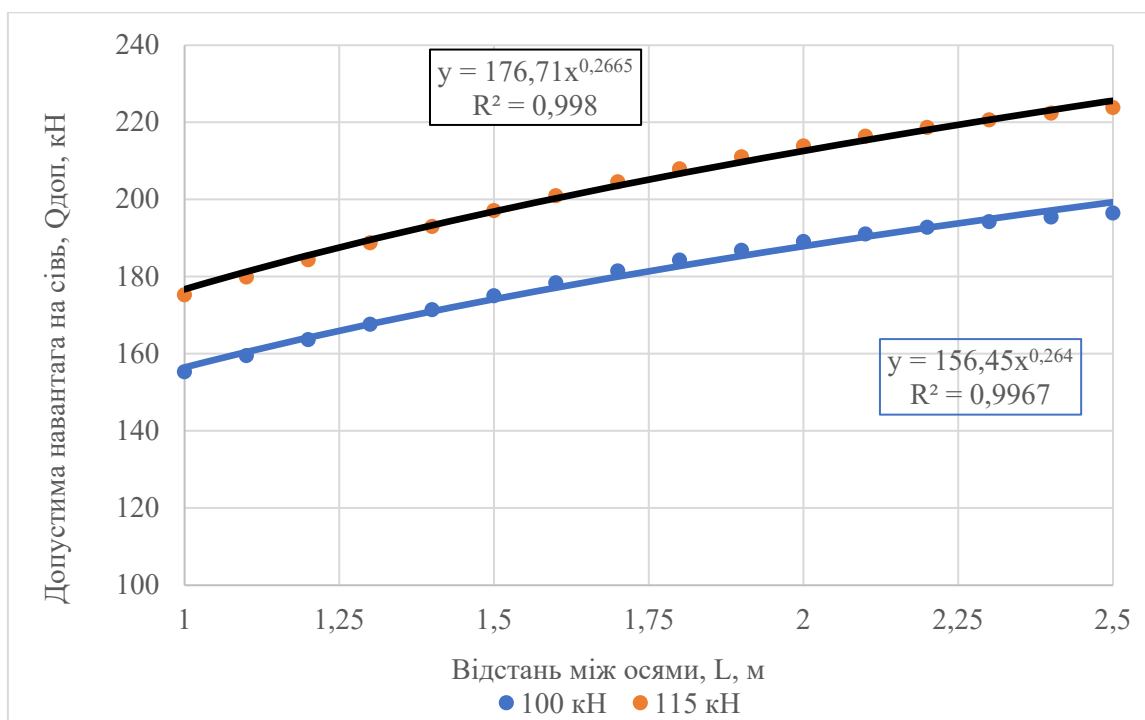
$$c_q = \dots + q \cdot \left(\frac{L_{i-1}}{D_{\delta}} \right) + 1 + q \cdot \left(\frac{L_{i+1}}{D_{\delta}} \right) + \dots \quad (22)$$

де, D_{δ} - діаметр відбитка колеса з навантаженням Q , який визначається за рис. 3.

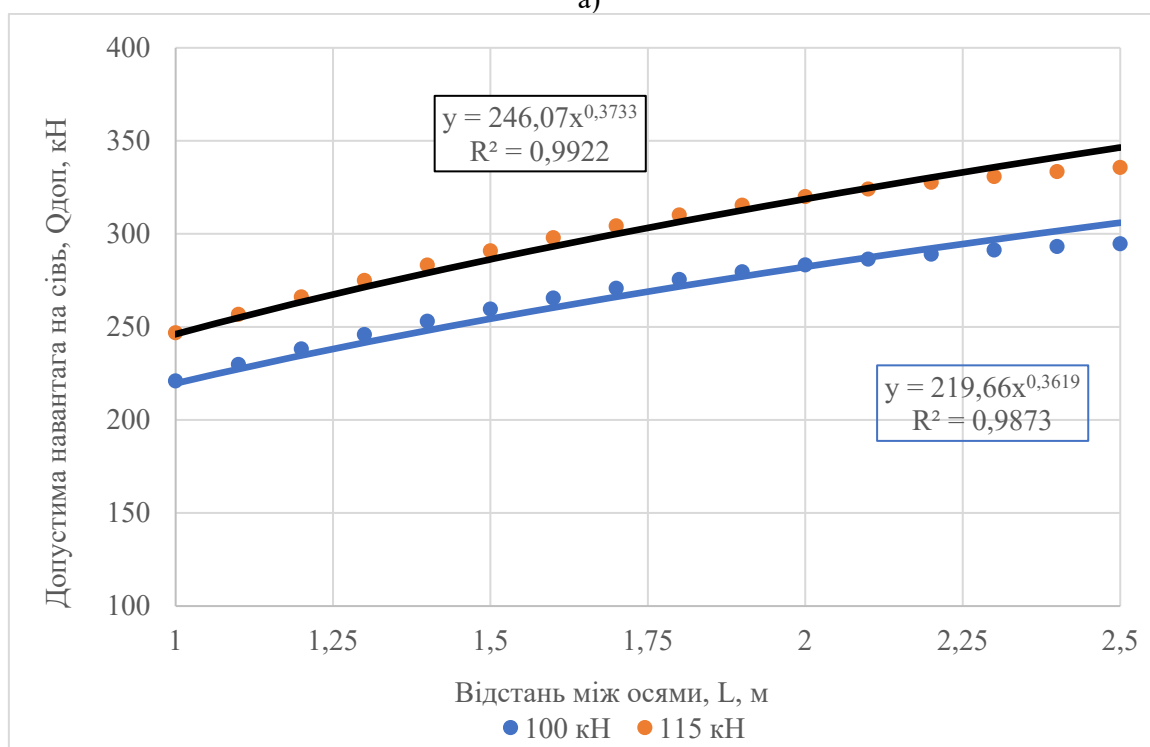


Крива 1 для дорожніх одягів капітального і полегшеного типу, крива 2 - для перехідного
Figure 1 for capital and lightweight pavements, curve 2 - for transitional pavements

Рисунок 3 – Функція, що характеризує вплив рухомого j -того колеса в поперечному напрямку на напружено-деформований стан дорожнього одягу під центром відбитка i -того колеса
Figure 3 - Function characterizing the effect of the moving j -th wheel in the transverse direction on the stress-strain state of the pavement under the center of the i -th wheel print



а)



б)

Рисунок 4 – Залежність допустимої навантаги на а) здвоєну та б) строєну вісь в залежності від відстані між осями

Figure 4 - Dependence of the permissible load on a) twin and b) axle depending on the distance between the axles

Таблиця 3 – Допустимі навантаги на зближені осі
Table 3 - Permissible loads on converged axles

Відстань між осями, м	Вісь здвоєна		Вісь строєна	
	100 кН	115 кН	100 кН	115 кН
<i>L</i>				
1	155,3	175,3	220,9	246,8
1,1	159,5	179,8	229,8	256,7
1,2	163,6	184,3	238,1	266,1
1,3	167,6	188,7	245,9	275,0
1,4	171,4	193,0	253,0	283,2
1,5	175,0	197,1	259,6	290,9
1,6	178,4	200,9	265,5	297,9
1,7	181,5	204,6	270,8	304,3
1,8	184,3	207,9	275,5	310,1
1,9	186,8	211,0	279,6	315,4
2	189,1	213,9	283,3	320,0

За формулами (19) – (22) виконано розрахунок допустимої навантаги на здвоєну та строєну осі ТЗ в залежності від відстані між осями (рис. 4, таблиця 3).

Уточнення методики визначення потрібного модуля пружності конструкції нежорсткого дорожнього одягу для автомобільних доріг

За даними випробувань $E_{заг}$ визначається за формулою

$$E_{заг} = \frac{p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{w}, \quad (23)$$

p – тиск в шинах, МПа;
 D – діаметр відбитку, см;
 μ – коефіцієнт Пуассона;
 w – прогин, мм.

Незалежно від способу приведення до 100 кН, 115 кН конструкції ДО повинні бути рівно міцні тобто

$$E_{заг1} = E_{заг2} \text{ або } \frac{p_1 \cdot D_1 \cdot (1 - \mu^2)}{w_1} = \frac{p_2 \cdot D_2 \cdot (1 - \mu^2)}{w_2} \quad (24)$$

Відповідно для навантаг 100 кН та 115 кН $E_{пот}$ визначається за формулою

$$E_{пот}^{100} = 42,843 \cdot \ln\left(\sum N_{p-100}\right) - b_{100}, \quad (25 \text{ а})$$

$$E_{пот}^{115} = 42,843 \cdot \ln\left(\sum N_{p-115}\right) - b_{115}, \quad (25 \text{ б})$$

З урахуванням (3-4) приведена інтенсивність для 100 кН, 115 кН будуть мати вигляд

$$\sum N_{R-100} = 365 \cdot \sum_{i=1}^k \left(\sum_{i=1}^k \left(\frac{Q_{факт}}{100кН} \right)^{4,4} \cdot N_i \cdot \left(\frac{(1 + \beta)^T - 1}{\beta} \right) \right) \cdot f_{смуги} \quad (26 \text{ а})$$

$$\sum N_{R-115} = 365 \cdot \sum_{i=1}^k \left(\sum_{i=1}^k \left(\frac{Q_{\text{факт}}}{115 \text{кН}} \right)^{4,4} \cdot N_i \cdot \left(\frac{(1+\beta)^T - 1}{\beta} \right) \right) \cdot f_{\text{смуги}} \quad (26 \text{ б})$$

Враховуючи, що $S_{100} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{Q_{\text{факт}}}{100 \text{кН}} \right)^{4,4}$ та $S_{115} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{Q_{\text{факт}}}{115 \text{кН}} \right)^{4,4}$ отримаємо

співвідношення

$$\frac{S_{115}}{S_{100}} = \left(\frac{115 \text{кН}}{100 \text{кН}} \right)^{4,4} = 1,85, \quad (27)$$

Підставивши (25) в (26б) отримується

$$\begin{aligned} E_{\text{ном}}^{115} &= 42,843 \cdot \ln \left(\left(\frac{S_{115}}{S_{100}} \right) \cdot \sum N_{p-100} \right) - b_{100} = 42,843 \cdot \ln (1,85 \cdot \sum N_{p-100}) - b_{100} = \\ &= 42,843 \cdot \left(0,615 + \ln \left(\sum N_{p-100} \right) \right) - b_{100} = 42,843 \cdot \ln \left(\sum N_{p-100} \right) + 26,348 - b_{100} = \\ &= 42,843 \cdot \ln \left(\sum N_{p-100} \right) - 323,862, \end{aligned} \quad (28)$$

За даними аналізу встановлено що $E_{\text{номр}}^{115}$ визначене за формулою (28) відрізняється від прийнятого в ГБН В.2.3-37641918-559 значення, $b_{115}=315,68$ на $323,862/315,68=1,026$ рази, або менше 3%.

За наведеними формулами (22 - 27) можна отримати значення потрібного модуля пружності для довільного значення навантаги. Але з позицій інваріантності більш доцільним є приведення потоку ТЗ до розрахункової осі 100 кН для розрахунку конструкції нежорсткого дорожнього одягу.

В подальшому, при урахуванні сезонності необхідно для знаходження відносного руйнуючого впливу навантаги в різні періоди року використовувати правило лінійного сумування пошкоджень Пангрема – Майнера, яке визначається за формулою

$$d = \sum_{i=1}^n \frac{n_{i*}}{N_{i*}} = 1, \quad (29)$$

де n_{i*} — кількість проїздів фактичних осей;

N_{i*} — допустима кількість проїзду розрахункових осей.

Висновки

Питання про призначення допустимого навантаження на зближені осі та про методику проектування дорожнього одягу на дію таких осей тісно пов'язані між собою. Вони зазвичай вирішуються шляхом визначення еквівалентної колісної чи осьової навантаження.

Методику визначення еквівалентного колісного та осьового навантаження відрізняються вибором механічного критерію еквівалентності (вертикальне напруження, прогини, горизонтальне напруження або деформація). Недоліком багатьох запропонованих методик є аналіз еквівалентного навантаження для нерухомого, а не для транспортного засобу, що рухається. При визначенні еквівалентного осьового навантаження різні методики дають різні значення навантаження, і не завжди ці значення логічно виправдані.

За даними аналізу встановлено що (28) від прийнятого в ГБН В.2.3-37641918-559 значення, $b_{115}=315,68$ на $323,862/315,68=1,026$ рази, або менше 3%.

За наведеними формулами (23 - 28) можна отримати значення потрібного модуля пружності для довільного значення навантаги. Але з позицій інваріантності більш доцільним є приведення потоку ТЗ до розрахункової осі 100 кН для розрахунку конструкції нежорсткого дорожнього одягу.

В подальшому, при урахуванні сезонності необхідно для знаходження відносного руйнуючого впливу навантаги в різні періоди року використовувати правило лінійного сумування пошкоджень Пангрема – Майнера.

Сезонне обмеження допустимих навантажень у різних країнах визнано економічно виправданим та стало регулярною практикою, особливо для доріг місцевого значення тому даний підхід необхідно розвивати та врахувати при розрахунку конструкцій дорожнього одягу.

Перелік посилань

1. Hudson W.R., Flanagan P.R. An examination of environmental versus load effects on pavements. // *Transp. Res. Rec.* 1987. № 1121, 34-39.
2. Oelking J., Roberts F. Tire contact pressure and its effect on pavement strain. / *Journ. Transp. Eng.*, 1987, 1, p. 56-71.
3. Monismith C.L. Pavement design: the fatigue subsystem. Highway Research Board Special Report, 1973, № 140, p. 1-19.
4. Kim O., Bell C.A., Wilson J.E. Effect of Increased Truck Tire Pressure on Asphalt Concrete Pavement // *J. Transp. Eng.* 1989. 115, № 4. С. 329-350.
5. ГБН В.2.3-37641918-559:2019 Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування.
6. Гамеляк І.П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: дис....доктора техн. наук / І.П. Гамеляк. К: Національний транспортний університет, 2005. – 525 с.
7. Радовский Б.С. и др. Проектирование дорожных одежд для движения большегрузных автомобилей. А.С. Супрун, И.И. Козаков. К.: Будивэльнык, 1989. 168 с.
8. Clarck S.K. Mechanics of rubber, designing and testing of rubber goods. International Rubber Conference. 10-14.10.1978.
9. Bonaquist R., Churilla C., Freund D. Effect of load, tire pressure, and tire type on flexible pavement response // *Public Road.* 1988. 52, № 1. С. 1-7.
10. Eisenmann J. Bewertung Der Strassenbeanspruchung. *Strasse und Autobahn*, 1979, № 3, 107-114.
11. Bonaquist R., Churilla C., Freund D. Effect of load, tire pressure, and tire type on flexible pavement response // *Public Road.* 1988. 52, № 1. С. 1-7.
12. Marshek K., Chen H.H., Connell B., Hudson R. Experimental determination of pressure distribution of truck tire-pavement contact. *Transp. Res. Rec.*, 1986, № 1070, 9-14.
13. Chen H.H., Marshek K.M., Saraf C.L. Effects of truck tire contact pressure distribution on the design of flexible pavements: a three-dimensional finite element approach. *Transp. Res. Rec.*, 1986, № 1095, 72-78.
14. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо реформування системи управління автомобільними дорогами загального користування» від 20.12.2011 р. № 4203-VI.
15. Довідник № 1 розрахункових характеристик ґрунтів, матеріалів покриття і основи дорожнього одягу та навантажень від транспортних засобів. 2018.
16. Huang Y.H. Computation of equivalent single-wheel loads using layered theory. - *Highway Research Record*, 1969, № 291, p. 144-155.
17. Gerrard C.M., Harrison W.J. A theoretical comparison of the effects of dual-tandem and dual-wheel assemblies on pavements. *Proc. 5th Conference of the Australian Road Research Board*, vol. 5, Part 4, Paper 645, 1970, p. 112-137.
18. The AASHO Road Test. Report 5. Pavements research. Spec. Report 61 E, Publ. 954. - Washington, 1962. - 351 p.

DETERMINATION OF THE REQUIRED MODULUS OF ELASTICITY OF RIGID PAVEMENT

Gameliak Igor P., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Transport University, Head of the Department of System Design of Transport Infrastructure Objects, Kyiv, Ukraine, e-mail: gip65n@gmail.com., +380503524124, <https://orcid.org/0000-0001-9246-7561>

Dmytrychenko Andij M., Candidate of Engineering Sciences, associate professor of department transport law and logistic, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: andrew_d@ukr.net, +380502816006, <https://orcid.org/0000-0001-6144-7533>.

Vitalii Raikovskiy F., PhD in Technical Sciences, Head of Scientific and Technical Support Sector, "DerzhdorNDI" SE, Kyiv, Ukraine, e-mail: vintikntu@ukr.net, tel. +380982846899, <https://orcid.org/0000-0002-6391-7647>

Summary. The paper considers the issue of determining the required modulus of elasticity from modern vehicles on non-rigid pavement depending on the value of the total mass, tire pressure, number of axles, and the influence of the vehicles' converging axles. The calculations are based on the methodology for bringing a vehicle to the standard load on the axle of the design axis of groups A2 (115 kN) and A3 (100 kN).

Keywords: permissible weight, converged axles, calculation criteria, standard load on the vehicle axle, tire pressure, deformation.

References

1. Hudson W.R., Flanagan P.R. An examination of environmental versus load effects on pavements. // *Transp. Res. Rec.* 1987. № 1121, 34-39.
2. Oielking J., Roberts F. Tire contact pressure and its effect on pavement strain. / *Journ. Transp. Eng.*, 1987, 1, p. 56-71.
3. Monismith C.L. Pavement design: the fatigue subsystem. - Highway Research Board Special Report, 1973, № 140, p. 1-19.
4. Kim O., Bell C.A., Wilson J.E. Effect of Increased Truck Tire Pressure on Asphalt Concrete Pavement // *J. Transp. Eng.* 1989. 115, № 4. C. 329-350.
5. HBN V.2.3-37641918-559:2019 Avtomobilni dorohy. Dorozhnii odiah nezhorstkyi. Proektuvannia
6. Radovskiy B.S. y dr. "Proektyrovanye dorozhnykh odezhd dlia dvyzhenyia bolshehruznykh avtomobylei" A.S. Suprun, Y.Y. Kozakov. K.: Vudynvlnyik, 1989. 168 s.
7. Gameliak I.P. Osnovy zabezpechennia nadiinosti konstrukttsii dorozhnoho odiahu: dys....doktora tekhn. nauk / I.P. Gameliak. K: Natsionalnyi transportnyi universytet, 2005. 525 s.
8. Clark S.K. Mechanics of rubber, designing and testing of rubber goods.- International Rubber Conference. 10-14.10.1978.
9. Bonaquist R., Churilla C., Freund D. Effect of load, tire pressure, and tire type on flexible pavement response // *Public Road.* 1988. 52, № 1. - C. 1-7.
10. Eisenmann J. Bewertung Der Strassenbeanspruchung.- *Strasse und Autobahn*, 1979, № 3, 107-114.
11. Bonaquist R., Churilla C., Freund D. Effect of load, tire pressure, and tire type on flexible pavement response // *Public Road.* 1988. 52, № 1. C. 1-7.
12. Marshek K., Chen H.H., Connell B., Hudson R. Experimental determination of pressure distribution of truck tire-pavement contact.- *Transp. Res. Rec.*, 1986, № 1070, 9-14.
13. Chen H.H., Marshek K.M., Saraf C.L. Effects of truck tire contact pressure distribution on the design of flexible pavements: a three-dimensional finite element approach. *Transp. Res. Rec.*, 1986, № 1095, 72-78.
14. Zakon Ukrainy «Pro vnesennia zmin do deiakykh zakoniv Ukrainy shchodo reformuvannia systemy upravlinnia avtomobilnymy dorohamy zahalnoho korystuvannia» vid 20.12.2011 r. № 4203-VI
15. Dovidnyk № 1 rozrakhunkovykh kharakterystyk gruntiv, materialiv pokryttia i osnovy dorozhnoho odiahu ta navantazhen vid transportnykh zasobiv.
16. Huang Y.H. Computation of equivalent single-wheel loads using layered theory. - Highway Research Record, 1969, № 291, p. 144-155.
17. Gerrard C.M., Harrison W.J. A theoretical comparison of the effects of dual-tandem and dual-wheel assemblies on pavements. Proc. 5th Conference of the Australian Road Research Board, vol. 5, Part 4, Paper 645, 1970, p. 112-137.
18. The AASHO Road Test. Report 5. Pavements research. Spec. Report 61 E, Publ. 954. Washington, 1962. 351 p.