

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ БАГАТОШАРОВИХ МОДЕЛЕЙ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ВУЛИЧНОЇ МЕРЕЖІ м. ПОЛТАВА ПРИ ТРОЛЕЙБУСНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Розглянуто склад та окремі фізико-механічні характеристики типових конструкцій дорожнього одягу вуличної мережі м. Полтава, а також технічні характеристики тролейбусів, що експлуатуються у вказаному місті. На основі проведеного аналізу, створено скінченно-елементні моделі дорожнього покриття та проведено їх розрахунок за допомогою програмного комплексу скінченно-елементного аналізу. Зроблено висновки щодо можливості подальшої експлуатації існуючого дорожнього покриття.

Ключові слова: дорожній одяг, технічні характеристики тролейбусів, скінченно-елементна модель дорожнього покриття.

Вступ. Існування точних рішень задач теорії пружності про багатошаровий напівпростір дозволяють виконати дослідження напружено-деформованого стану (НДС) традиційних конструкцій нежорсткого дорожнього одягу, а саме визначити розподіл зусиль у шарах дорожнього покриття в залежності від типорозміру шин транспортного засобу, спрогнозувати характер розвитку тріщин у процесі служби покриття тощо [1]. Ці рішення можливо реалізувати за допомогою ряду сучасних комп'ютерних програм, таких як NASTRAN (Femap), ANSYS, SCAD, Cosmos, BISTRO, BISAR, LAYMED, CHEVRON-5L, PAKADAPT, MTC-93, АЛГОФОРТ та інших. Розв'язок описаних вище задач досліджень у вказаних програмах базується на застосуванні методу скінченних елементів (МСЕ) [7]. Із появою можливості отримувати точні розв'язки даним методом за допомогою комп'ютерних програм, сьогодні такий напрямок досліджень все частіше застосовується та набуває широкого інженерного використання.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Результати досліджень із застосуванням комп'ютерних програм на базі МСЕ все частіше висвітлюються у науковій літературі. Зокрема у роботі [3] проведено узагальнене порівняння несучої здатності і деформативності різних типів покриття велосипедних доріжок на основі моделювання їх роботи МСЕ та визначено оптимальні товщини шарів найпоширеніших типів покриття велосипедних шляхів. I.L. Al-Qadi та H. Wang у Японії [8] провели

моделювання МСЕ дорожнього покриття, за результатами якого визначили розподіл зусиль у всіх його шарах при різних конфігураціях шин транспортних засобів. У роботі [6] А.Е. Мерзлікін та Н.В. Капустніков при визначенні НДС пружного багатошарового напівпростору як еталон використовували рішення А.К. Пріварнікова. З еталонними даними порівнювали результати розрахунку моделей МСЕ. Оцінка похибок МСЕ показала, що приступаючи до скінченно-елементного аналізу дорожнього одягу, слід усвідомити не тільки те, яка частина конструкції повинна досліджуватися докладніше, але і як поводитися в напівпросторі досліджувана компонента НДС. Тобто необхідно якомога точніше передбачати граничні умови роботи цієї компоненти.

Склад типового багатошарового дорожнього одягу експлуатованої тролейбусами вуличної мережі м. Полтава проаналізований у науковій роботі [5], виконаній під керівництвом В.В. Ільченка. Згідно цього аналізу склад двох типових конструкцій дорожнього одягу вуличної мережі м. Полтава наведено у таблиці 1, де номери шарів вказані знизу до верху дорожнього полотна. Також у роботі [5] оцінено експлуатований стан дорожнього одягу: зростання інтенсивності руху та збільшення в транспортному потоці частки автобусів і тролейбусів спричинило наявність значної кількості деформацій, що погіршують умови й безпечність руху транспорту [4].

У попередній частині роботи по окресленій тематиці, опублікованій в [2**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], виконано аналіз розподілу вертикальних навантажень на дорожній одяг від моделей тролейбусів, що експлуатуються на території України. Окремі технічні характеристики тролейбусів подані в таблиці 2. Із аналізу слідує, що найбільше навантаження виникає під колесами низькопідлогового тролейбуса Богдан Т701.10 за рахунок зменшеного типорозміру використаних шин.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. У проаналізованих опублікованих наукових працях не знайшло відображення врахування зміни навантажень і площадок їх розподілу під час модернізації тролейбусів на коефіцієнт запасу міцності дорожнього одягу. Також не перевірено, чи задовольнятиме конструкція дорожнього одягу в цьому випадку вимогам щодо зсуву в ґрунті земляного полотна та піщаному шарі й на розтяг при згині.

Постановка завдання. Зростання інтенсивності навантажень від тролейбусів та зменшення площі контакту їх коліс із дорожнім покриттям вимагає уточнення граничних значень компонентів дорожнього одягу. Тож необхідно визначити вплив вказаних факторів на НДС багатошарового дорожнього покриття, застосувавши для досліджень чисельне моделювання МСЕ.

Таблиця 1

Склад та окремі фізико-механічні характеристики типових конструкцій дорожнього одягу вуличної мережі м. Полтава [5]

№ шару (знизу вверху)	Назва шару	Товщина шару h , см	Модуль пружності шару E , МПа	Коефіцієнт Пуассона ν	Примітка
Конструкція дорожнього одягу типу 1					
грунт земляного полотна – суглинок			52		$\varphi = 38^\circ$, $c=0,015\text{кПа}$
1	пісок дрібнозернистий	10	100	0,33	
2	бруківка з грубоколотого каменю	15	300	0,2	
3	асфальтобетон дрібнозернистий	5	2400	0,25	
4		8	2400	0,25	
5		7	2400	0,25	
6		5	2400	0,25	
7		6	2400	0,25	
Конструкція дорожнього одягу типу 2					
грунт земляного полотна – суглинок			52		$\varphi = 38^\circ$, $c=0,015\text{кПа}$
1	пісок дрібнозернистий	20	100	0,33	
2	щебінь насипний	20	300	0,22	
3	асфальтобетон дрібнозернистий	6	2400	0,25	
4		6	3200	0,25	

Основний матеріал. Чисельне моделювання НДС ділянки дорожнього одягу проведено за допомогою програмного комплексу скінченно-елементного аналізу Femar 10.1.1 SC 32bit / 64 bit. Під час досліджень використовувалась учбова демо-версія SDRC-FEMAP 8/1a S/N 000-00-00-DEMO-406F-00000000.

Створення скінченно-елементної моделі ділянки дорожнього покриття виконувалось в наступному порядку:

1. створення об'ємного тіла моделі з урахуванням пошарового складу моделі з різних матеріалів (див. стовпчик 3 таблиці 1);
2. задавання фізико-механічних характеристик шарів покриття (модуля пружності Юнга E , коефіцієнта поперечних деформацій ν) та діаграм роботи матеріалів (див. стовпчик 4 і 5 таблиці 1);

Таблиця 2

Вибрані розрахункові характеристики тролейбусів [2]

Технічні характеристики	Модель тролейбуса				
	Skoda 15Tr	Київ- 11, ЮМЗ Т1	ЛАЗ- 52522	ЛАЗ Е301Д 1	Богдан Т701.1 0
Верт. навантаження, кН:					
– на переднє колесо	27,5	32,4	32,8	32,5	37,5
– на заднє колесо	27,0	30,6	28,8	30,0	28,8
Зсувна горизонт. сила на задньому ведучому колесі, кН	1,25	1,27	1,35	1,59	1,68
Розміри площадки контакту між колесом та дорожнім покриттям $l \times b$, мм	330×275	352×313	330×275	320×279	302×279

- розбиття створеної геометрії моделі на скінченні елементи типу Hex Mesh (гексаедр). Розмір скінченних елементів залежав від часу створення об'ємної скінченно-елементної сітки, необхідного дискового простору для проведення ПК розрахунку, а також товщини шарів моделі. Оптимізований розмір ребер використаних елементів становив 4...6 см;
- накладення граничних умов на створену модель (див. рис. 1). Вузли скінченних елементів на підшві моделі обмежували в переміщеннях по трьом осям (x , y , z), а вузли скінченних елементів на бокових поверхнях обмежували тільки по осях x та y . Навантаження прикладали нерівномірне (із збільшенням до центру площадки) нормальне до площадки, розміри якої вказані у останньому рядку таблиці 2, розташованої посередині верхньої поверхні моделі;
- контроль коректності скінченно-елементної решітки. Проведення нелінійного скінченно-елементного аналізу моделі із врахуванням заданих діаграм роботи матеріалів. Формування результатів розрахунку: діаграм розподілу напружень та деформацій (див. рис. 2). Узагальнення та порівняння результатів розрахунку різних моделей покриття (табл. 3).

Під час аналізу напружено-деформованого стану моделей дорожнього покриття акцентувалася увага на наступні характеристики: вертикальні σ_z та горизонтальні σ_x чи σ_y напруження, а також вертикальні w_z та горизонтальні w_y та w_x деформації. До таблиці 3 занесено графіки зміни функцій $\sigma_z(z)$, $\sigma_x(z)$, $\sigma_y(z)$ та $w_z(z)$, $w_x(z)$, $w_y(z)$ у товщі по осі симетрії моделі, нормальній до верхньої поверхні зразка, для різних типів покриття. При цьому по осі абсцис відкладено числові значення зміни напружень в кПа чи переміщень у 10^{-6} м, а по осі ординат – товщину складових існуючого покриття.

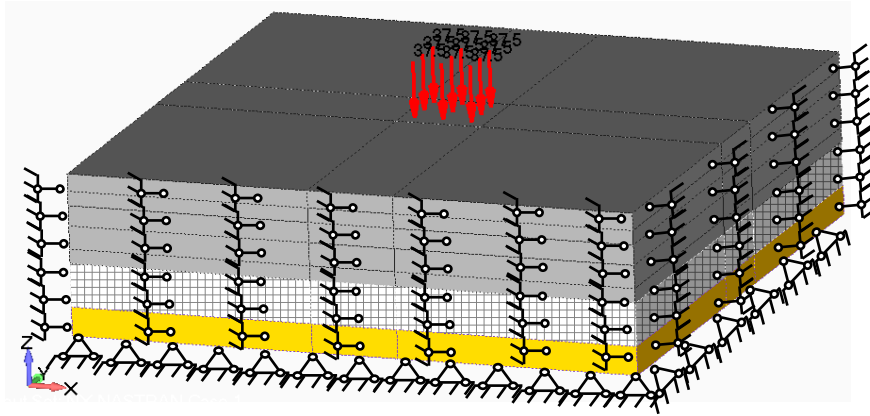


Рис. 1. Розрахункова модель дорожнього покриття (тип 1)

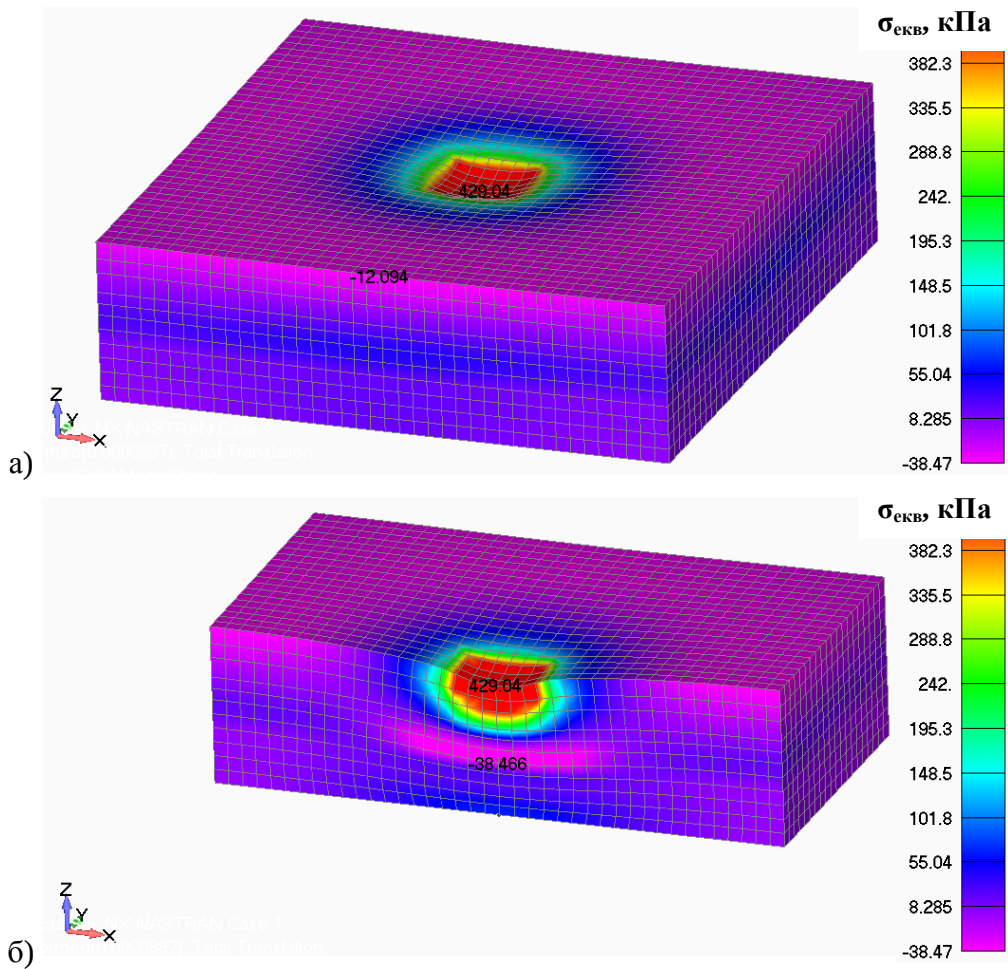
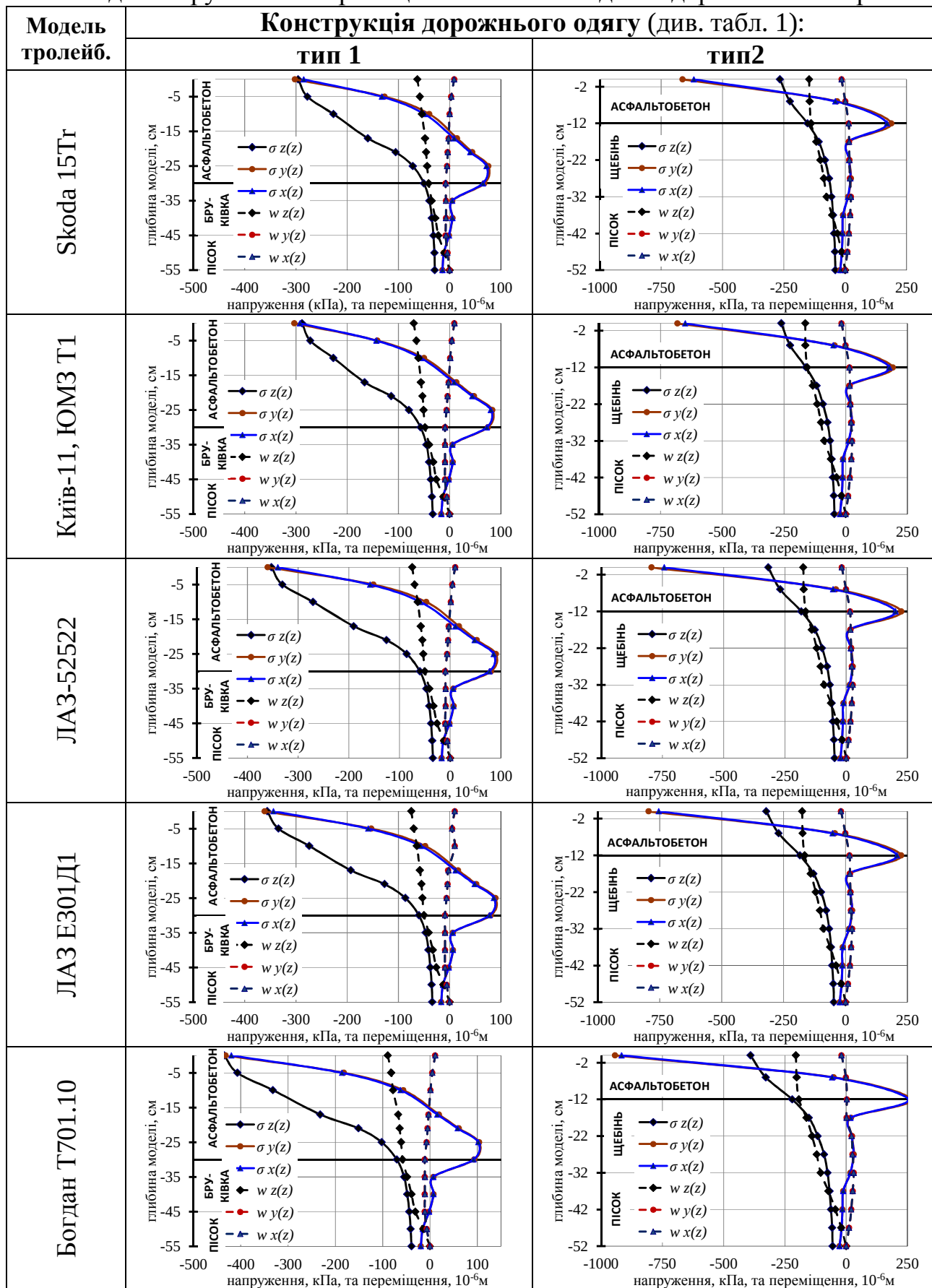


Рис. 2. Розподіл головних напружень на поверхні (а) та у середньому перерізу (б) СЕ моделі

З поданих у таблиці 3 графіків просліджується наступна закономірність зміни напружень у товщі покриття: нормальні напруження до вертикальної вісі (осі навантаження) σ_z мають максимальне значення близько 250...420 кПа безпосередньо на поверхні покриття під площиною навантаження та зменшуються по однаковому закону до гранично допустимого значення на підшві моделі покриття. Вертикальні деформації w_z теж мають найбільше значення $10...25 \times 10^{-5}$ м на поверхні покриття та практично рівні нулю на підшві моделі покриття. Нормальні напруження до горизонтальних осей σ_x та σ_y на рівні площини навантаження мають значення стиску 300...900 кПа, а на

Таблиця 3

Розподіл напружень та переміщень по висоті моделей дорожнього покриття



межі шарів асфальтобетону та бруківки (чи щебеню) моделі переходять в зону розтягу та мають значення 100...250 кПа, стабілізуючись у товщі підстилочних шарів щебеню та піску до гранично допустимих значень.

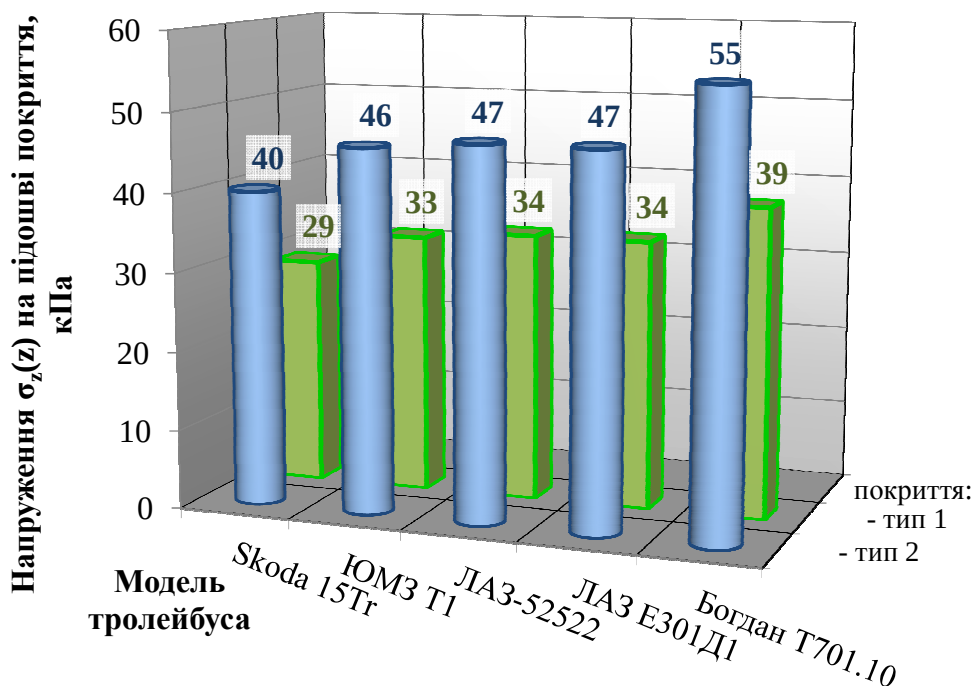


Рис. 3. Порівняння напружень на підшві різних моделей покриття

Висновки. За результатами чисельного моделювання напружено-деформованого стану ділянки дорожнього покриття під дією тролейбусного навантаження у програмному комплексі скінченно-елементного аналізу визначено значення напружень на підшві покриття (на межі із ґрунтом земляного полотна). Встановлено модель тролейбуса – Богдан Т701.10 (див. рис. 3), що викликає найбільші напруження у дорожньому покритті вулиць під час їх експлуатації за рахунок зменшеного типорозміру використаних шин.

Література

1. ВБН В.2.3-218-186-2004. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу. – К.: Укравтодор, 2004. – 160 с.
2. Гасенко А.В. Аналіз зміни навантажень на дорожній одяг від тролейбусів під час їх еволюції на території незалежної України / А.В. Гасенко, В.В. Ільченко, Є.О. Загорулько // Матеріали І науково-практичної інтернет-конференції з міжнародною участю «Надійність та безпека об'єктів будівництва» (Черкаси, 1 січня – 31 березня 2016 р.) – Черкаси: ЧПБ, 2016. – С. 33 – 35.
3. Гасенко Л.В. Дослідження пружних багатошарових моделей для розрахунку дорожнього одягу велосипедних шляхів методом скінченних

елементів / Л.В. Гасенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту : науковий журнал. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – Вип. №4 (121). – С. 20 – 24.

4. ДСТУ 3587-97. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану. К.: Держстандарт України, 1997. – 14 с.

5. Ільченко В.В. Експлуатаційний стан вуличної мережі м. Полтава (на прикладі вул. Леніна) / В.В. Ільченко, Р.А Міщенко, О.М. Грисенко // Проблеми сучасного будівництва : Матеріали Всеукраїнської Інтернет-конференції молодих учених і студентів 21-22 листопада 2012 року. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – С. 51 – 54.

6. Мерзликин А.Е. Моделирование упругого однородного и двухслойного полупространства применительно к задачам по расчету дорожных одежд методом конечных элементов / А.Е. Мерзликин, Н.В. Капустников // Дороги и мосты. Омск: СибАДИ, 2011. – № 1(25). – С. 63 – 72.

7. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows / Д.Г. Шимкович – М.: ДМК, 2003. – 448 с.

8. Al-Qadi I.L. Full-depth pavement responses under various tire configurations: accelerated pavement testing and finite element modeling / I.L. Al-Qadi, H. Wang. – Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. – 2009. – V. 78. – PP. 721 – 760.

Аннотация

Рассмотрено состав и отдельные физико-механические характеристики типовых конструкций дорожной одежды уличной сети г. Полтава, а также технические характеристики троллейбусов, которые эксплуатируются в данном городе. На основе проведенного анализа, создано конечно-элементные модели дорожного покрытия и проведено их расчет с помощью программного комплекса конечно-элементного анализа. Сделаны выводы о возможности дальнейшей эксплуатации существующего дорожного покрытия.

Abstract

The composition and certain physical and mechanical characteristics typical constructions of the street network and pavement specifications trolleybuses in Poltava. Created finite element model road covering on the basis of the analysis. The calculation using their software complex finite element analysis. Conclusions on the possibility of further use of the existing road surface.