

СУЧАСНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

Салій І.В.¹, Кияшко В.Т.¹, Косарчук В.В.², Агарков О.В.², Ковальчук В.В.², Чаусов М.Г.³

¹Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ
deaohoronaprasi@gmail.com;

²Державний університет інфраструктури та технологій
вул. Кирилівська, 9, 04071, м. Київ

kosarchuk_vv@gsuite.uit.edu.ua, agarcov@gmail.com, kovalchuk_vv@gsuite.uit.edu.ua;

³Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв оборони, 15, 03041, м. Київ
m.g.chausov@gmail.com

Мета роботи – аналіз основних напрямів використання чисельних методів механіки деформованого твердого тіла, зокрема методу скінченних елементів для розрахунку напружено-деформованого стану елементів конструкції дорожнього одягу. У нормативних документах, що регламентують порядок указаних розрахунків, використовують занадто спрощені розрахункові схеми, які не відображають особливості структури, взаємодії та механічної поведінки елементів дорожнього одягу різних типів. Тому результати таких розрахунків суттєво залежать від великої кількості емпіричних поправочних коефіцієнтів. Під час використання методу скінченних елементів можна за однією розрахунковою схемою розглядати одночасний вплив усіх складників напружено-деформованого стану й брати до уваги водночас реальні геометричні форми досліджуваних об'єктів. Актуальність роботи зумовлена тим, що цей метод останнім часом дедалі частіше стали використовувати в практиці проектування автомобільних доріг. Визначено основні напрями використання методу скінченних елементів для проектування дорожнього одягу, а саме: розрахунки теплового і напружено-деформованого стану складових елементів дорожнього одягу за різних умов температурно-силового навантаження; верифікація чисельних розрахунків за результатами експериментальних досліджень моделей дорожнього одягу на спеціальних лабораторних стендах; створення спеціального програмного забезпечення для проведення багатоваріантних розрахунків. Аналіз опублікованих результатів досліджень, проведений у роботі, дає змогу стверджувати, що під час правильного вибору розрахункової схеми метод скінченних елементів забезпечує доволі точні оцінки для напружень і деформацій у такій складній конструкції, як багатошаровий дорожній одяг. Використання чисельних методів розрахунку напружено-деформованого стану елементів конструкції дорожнього одягу має великі перспективи для практичного використання. Тому в Україні є необхідність систематизувати відповідні дослідження і скоординувати роботи науковців у цьому напрямі. *Ключові слова:* напружено-деформований стан, дорожній одяг, метод скінченних елементів.

Modern methods of analysis of stress-strain state of road pavement. Saliy I., Kiyashko V., Kosarchuk V., Agarcov O., Kovalchuk V., Chausov M.

The aim of this article is to analyze the main ways of using numerical methods of mechanics of deformed solids, in particular, the method of finite elements to calculate the stress-strain state of structural elements of road pavement. The normative documents, that regulate the order of the specified calculations, use too simplified calculation schemes, which do not reflect features of structure, interaction and mechanical behavior of elements of road pavement of different types. Therefore, the results of such calculations significantly depend on a large number of empirical correction factors. When using the finite element method, it is possible to consider the simultaneous influence of all components of the stress-strain state according to one calculation scheme and to take the real geometric shapes of the studied objects into account. The relevance of this study is that recently usage of this method in the practice of road design increased significantly. The main directions of using the finite element method for designing pavement are determined, namely: calculations of thermal and stress-strain state of components of pavement under different conditions of temperature and power load; verification of numerical calculations based on the results of experimental studies of road clothing models on special laboratory stands; creation of special software for multivariate calculations. The analysis of the published research results carried out in this work allows us to state that with the correct choice of the calculation scheme the finite element method provides quite accurate estimates for stresses and strains in such a complex structure as multilayer road pavement. The use of numerical methods for calculating the stress-strain state of construction elements road pavement has great prospects for practical use. Therefore, in Ukraine there is a need to systematize relevant research and coordinate the work of scientists in this direction. *Key words:* stress-strain state, road pavement, finite element method.

Постановка проблеми. Конструювання багатошарового дорожнього одягу жорсткого типу полягає в розробленні кількох варіантів конструкції для подальшого визначення товщини шарів і вибору оптимального варіанта. Водночас потрібно забезпечити міцність конструкції завдяки використанню матеріалів з оптимальними фізичними властивостями для заданих умов експлуатації. Розрахунок напружено-деформованого стану (НДС) є одним із найважливіших етапів проектування конструкції дорожнього одягу. Точність і надійність таких розрахунків залежить від вибраних методів розрахунку та відповідних розрахункових схем. Розрахунки дорожнього одягу з використанням чисельних методів механіки деформованого твердого тіла потребують досить високої кваліфікації дослідника та спеціального вартісного програмного забезпечення. Тому вітчизняні проєктні організації використовують застарілі напівемпіричні нормативні методики. Нормативні документи [1–3] для аналізу НДС елементів дорожнього одягу регламентують використання доволі спрощених розрахункових схем. Це зумовлено тим, що для конструкцій дорожнього одягу складові елементи є структурно неоднорідними, мають різну механічну поведінку й водночас ще й контактують між собою. За таких вихідних умов задача розрахунку НДС є надзвичайно складною й поки що не має теоретичного розв'язання. Тому нормативні розрахунки як вихідні дані потребують великої кількості емпіричних коефіцієнтів. Це, зі свого боку, суттєво впливає на узгодженість отриманих результатів із даними практичних спостережень.

Перспективним напрямом для розрахунку НДС елементів конструкції дорожнього одягу є використання чисельних методів механіки деформованого твердого тіла, наприклад методу скінченних елементів (МСЕ) [4]. Проте сьогодні поки ще немає єдиної методики розрахунку напружено-деформованого стану елементів конструкції дорожнього одягу за допомогою МСЕ, яка була б регламентована в Україні або в інших країнах. Для вказаної складної конструкції (з погляду математичного моделювання) розрахунки доцільно виконувати з поступовим ускладненням розрахункової моделі з огляду на відповідний аналіз результатів. Саме за такого підходу можна визначити суттєві чинники й параметри розрахункової схеми, що впливають на результати розрахунків.

У роботі розглянуто основні напрями використання МСЕ для розрахунку НДС елементів дорожнього одягу.

Актуальність дослідження. Як і будь-яка інженерна споруда, конструкція дорожнього одягу має бути міцною, надійною, довговічною й відповідати певним експлуатаційним вимогам. Розвиток сучасних технологій спонукає науковців приділяти велику увагу розробленню нових і оптимізації наявних методів розрахунку дорожніх конструкцій. Використання

МСЕ для розрахунку напружено-деформованого і теплового стану конструктивних елементів дорожнього одягу донедавна було предметом тільки дисертацій [5; 6]. Проте останнім часом завдяки стрімкому розвитку обчислювальної техніки інтерес до таких досліджень значно зріс, особливо в розвинених країнах. Оскільки в нашій країні є тільки поодинокі спроби використання МСЕ для розрахунку дорожніх покриттів, розглянемо можливі напрями досліджень на прикладі публікацій у міжнародних журналах. Водночас зауважимо, що з огляду на обмежений обсяг статті будемо розглядати тільки деякі роботи, на матеріалі яких проілюструємо поступовий розвиток методики чисельних розрахунків стосовно аналізу НДС дорожнього покриття та перспективи використання цих результатів у практиці вітчизняних проєктних організацій.

Дослідження проведені в межах виконання етапу «Аналітичні та теоретичні дослідження основ проектування дорожнього одягу жорсткого типу з використанням відходів гірничодобувної промисловості» НДР «Розроблення екологічно прийнятних технологій поводження з відходами гірничорудної та металургійної промисловості», номер Державної реєстрації 0120U101148.

Виклад основного матеріалу. Використанню МСЕ для розрахунку конструкцій дорожнього одягу присвячено чимало робіт, у більшості з яких розглянуто нежорсткі типи покриття. Перші роботи вказаного спрямування з'явилися в середині 60-х років минулого століття після розроблення універсальних пакетів прикладних програм, які реалізували МСЕ. Розглядалися доволі прості розрахункові схеми, у яких дорожній одяг моделювався плитою скінченного розміру, що складалася з кількох шарів із різними механічними властивостями [7; 8]. Транспортне навантаження моделювали вертикальними силами, рівномірно розподіленими по відбитку колеса. За такої постановки задачі плита перебувала у плоскому напруженому стані. Задача розв'язувалась у пружній осесиметричній постановці. Хоча така розрахункова схема суттєво відрізнялася від реальної конструкції дороги, результати розрахунків дали можливість перевірити точність самого методу скінченних елементів (на початку впровадження методики чисельних розрахунків у практику проєктно-конструкторських робіт у інженерів виникали сумніви щодо точності цього чисельного методу).

На рис. 1 порівнюються дані чисельних розрахунків із теоретичними (аналітичними) розрахунками плит методами теорії пружності (до речі, останні використовувались у відповідних нормативних документах того часу). Штриховими лініями показано результати розрахунку прогинів і вертикальних нормальних напружень багатошарової плити методом скінченних елементів, суцільними лініями – результати розрахунків за аналітичними формулами теорії пружності.

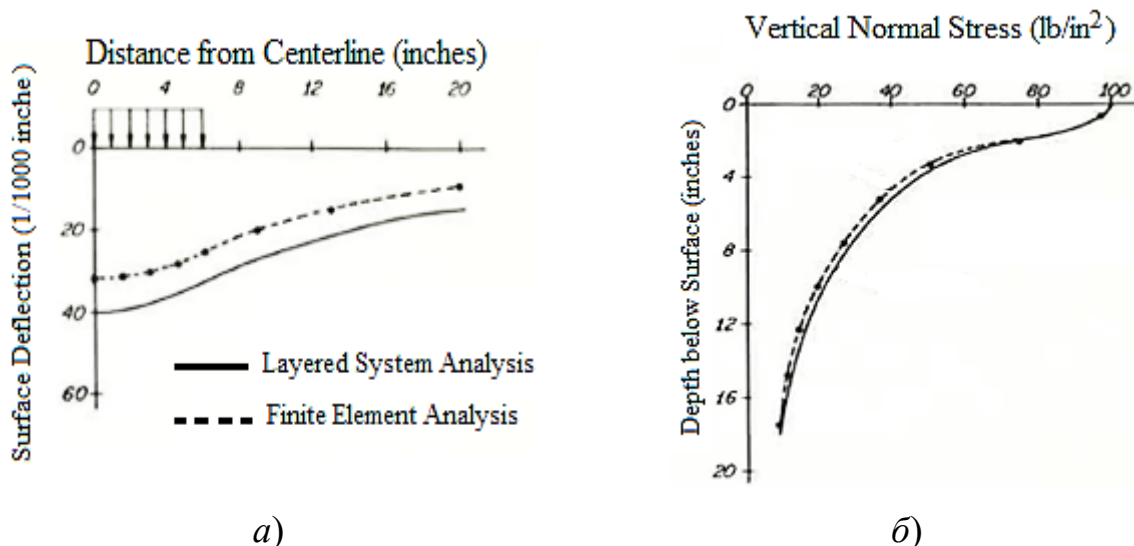


Рис. 1. Порівняння теоретичних і чисельних розрахунків прогинів (а) і нормальних напружень (б) [8]

Як бачимо, величини напружень (рис. 1, б), розраховані МСЕ, у цьому випадку доволі точно відповідають теоретичним значенням. Проте точність моделювання прогинів була значно меншою (рис. 1, а). Тут варто зауважити, що такий результат не дивує, оскільки розрахункові скінченноелементні моделі мали доволі розріджену сітку, а точність визначення переміщень безпосередньо пов'язана з густиною сітки скінченних елементів. На той час обчислювальні можливості комп'ютерів були обмеженими, тому отримати більш точні результати було неможливо.

Розвиток обчислювальних потужностей комп'ютерів і розроблення нових програмних систем, що реалізують МСЕ, таких як ANSYS, ABAQUS, ADINA, NASTRAN та інші, надали інженерам-проектувальникам можливість уточнити розрахункові схеми, наблизити їх до схем реальних конструкцій. Стало можливим враховувати нелінійну механічну поведінку окремих шарів багатшарового дорожнього одягу, з більшою точністю розраховувати контактні напруження на межі розділу шарів, враховувати нелінійний характер розподілу температур у шарах конструкції тощо [9–16]. Останні досягнення в розв'язанні проблеми взаємодії транспортних засобів із дорожнім одягом стосуються розрахунків довговічності покриття з огляду на циклічність режиму навантаження й моделювання процесу руйнування покриття методами теорії тріщин. Проте ці роботи поки що залишаються дослідницькими і в практику роботи конструкторських бюро досі не впроваджені. Хоча в деяких державах уже розробляють відповідні нормативні документи [17]. Тому і в Україні є потреба систематизувати відповідні дослідження і скоординувати роботи науковців у цьому напрямі.

Розгляньмо більш докладно результати досліджень НДС дорожнього одягу, що було опубліковано останнім часом.

Аналіз механічної поведінки двошарової гнучкої конструкції автомобільної дороги, що складається із зернистої основи з поверхневим шаром асфальту, проведений у роботі [18]. Залишкова деформація або колійність на поверхні асфальту спостерігається як основна проблема в тонкому шарі твердої поверхні. У вказаному дослідженні запропоновано нову методику визначення прогинів поверхні двошарової автомобільної дороги для двох випадків передачі навантаження від транспортного засобу: через вісь з одним і з двома колесами. Представлену методику було розроблено на основі розв'язання задачі теорії пружності у тривимірній постановці, для розв'язання якої методом скінченних елементів було використано програмний комплекс ABAQUS. Особливостями розрахункової схеми (рис. 2) є: передача навантаження через відбиток шини прямокутної форми, проведення серії розрахунків для різних співвідношень характеристик пружності гранульованого шару основи й асфальтного покриття, а також для різних товщин шарів покриття та основи.

Встановлено, що співвідношення коефіцієнтів Пуассона покриття та основи мало впливає на механічну поведінку двошарової конструкції. На нашу думку, такий результат був очікуваний і пов'язаний із тим, що основа моделювалась суцільним матеріалом, тоді як насправді вона є зернистим, тобто неоднорідним, середовищем. З інших результатів цієї роботи вкажемо на встановлені залежності прогинів і напружень від співвідношення модулів пружності покриття та основи, від співвідношення товщин шарів дороги, а також від ширини відбитка шин.

Важливим питанням впровадження чисельних методів у практику розрахунку доріг залишається верифікація результатів розрахунків, особливо під час використання нелінійних моделей поведінки матеріалів. Зазначимо, що аналітичних результатів

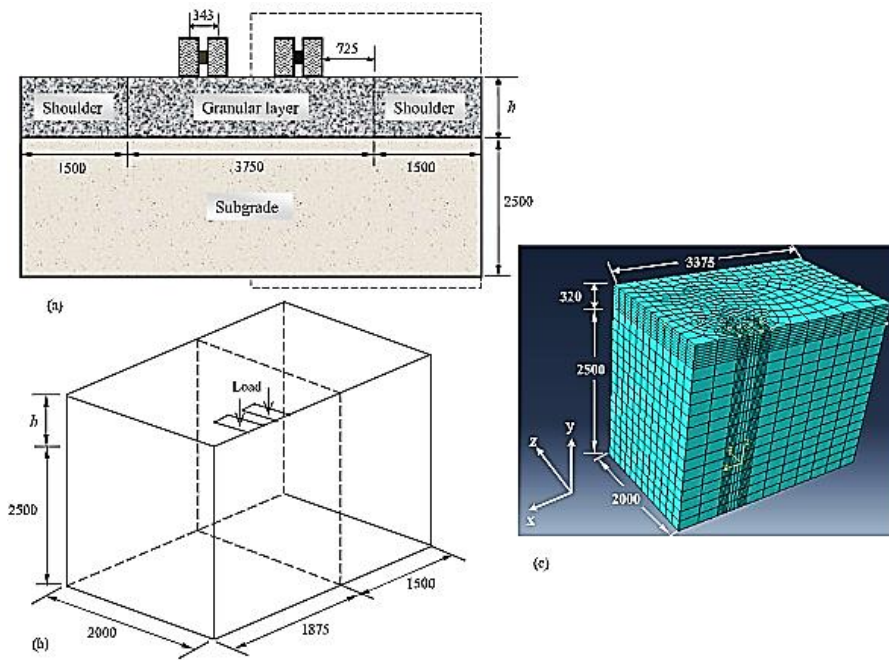


Рис. 2. Розрахункова схема дорожнього одягу [18]

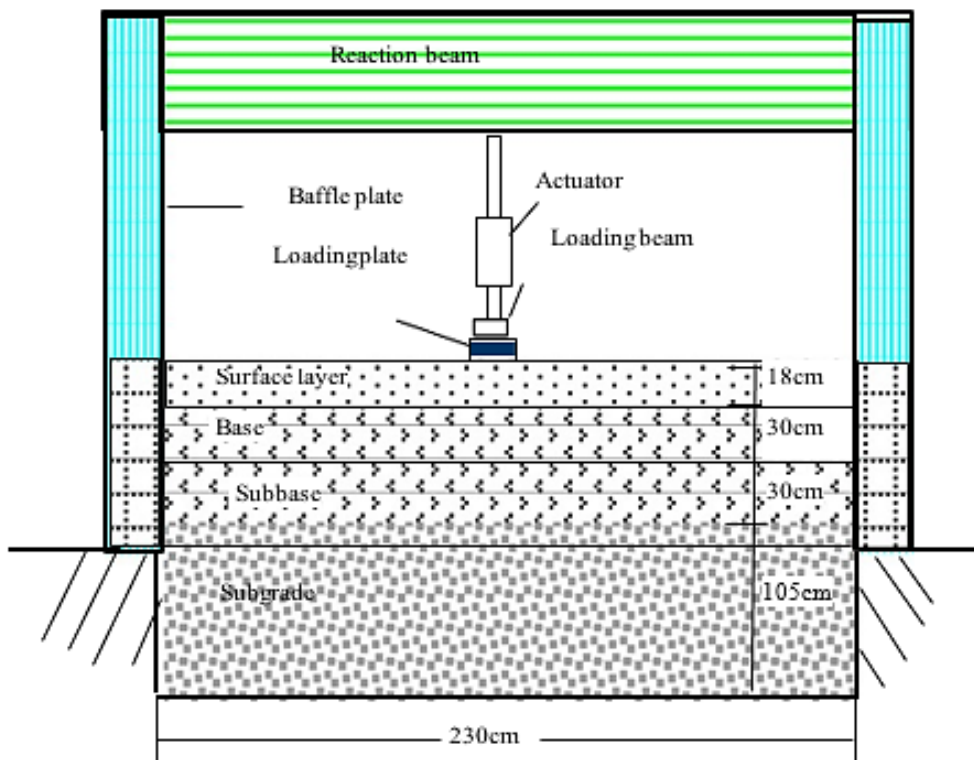


Рис. 3. Схема стенду для лабораторних досліджень [19]

розв'язання таких задач немає, тому єдиною можливістю перевірити точність розрахунків є співставлення їхніх результатів із даними експериментальних досліджень. У роботі [19] розглянуто схему проведення експериментальних досліджень меха-

нічної поведінки моделі дороги з багат шаровим дорожнім одягом (рис. 3).

Динамічне циклічне навантаження моделі дорожнього одягу здійснювали за допомогою штамп. Реакцію моделі на навантаження визначали шляхом

вимірювання (за допомогою спеціальних датчиків) переміщень у різних точках моделі, зокрема на межі розділу шарів. Така сама модель використовувалась як розрахункова схема під час чисельних експериментів, які проводили з використанням комерційної програмної системи, що реалізує МСЕ. Порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними показало їхню добру узгодженість навіть під час оцінювання залишкових деформацій, для чого в розрахунках використовували нелінійні моделі деформування матеріалів.

Результати, отримані в роботі, дають підстави стверджувати, що під час правильного вибору розрахункової схеми (геометричної моделі конструкції, моделі граничних умов і моделей деформування матеріалів) метод скінченних елементів дає доволі точні результати визначення напружень і деформацій у такій складній конструкції, як багатшаровий дорожній одяг.

Заслугує уваги ще одна робота, яка присвячена питанням автоматизації проєктних розрахунків конструкцій доріг різного типу [20]. Тут варто зазначити, що для проведення якісних розрахунків за допомогою сучасних спеціалізованих програмних систем, таких як ABAQUS або ANSYS, користувач повинен мати ґрунтовні знання з таких розділів механіки деформованого твердого тіла, як теорії пружності, пластичності, повзучості, тріщинності, а також добре володіти чисельними методами вищої математики, розумітися на програмуванні, знати основи матеріалознавства й низки

інших галузей науки. Звичайний інженер у галузі проєктування доріг зазвичай має великий практичний досвід, але не має ґрунтовної теоретичної підготовки. Тому доволі актуальним є питання автоматизації проєктних робіт із використанням універсальних програмних систем, що реалізують МСЕ. Така автоматизація є можливою, якщо застосувати так звані параметричні обчислення, суть яких полягає в тому, що на етапі підготовки розрахункової схеми деякі її характеристики задають у вигляді параметрів (наприклад, кількість шарів дорожнього одягу або відношення величин модулів пружності шарів, відношення ширини відбитку колеса до ширини проїзної частини тощо). Тоді з результатів розрахунку, беручи до уваги конкретні значення цих параметрів, можна отримати результати для інших значень параметрів. Тут варто зауважити, що діапазон зміни вказаних параметрів має бути таким, щоб фізична суть задачі не змінювалася (скажімо, замість пружної поведінки матеріалу за невеликих навантажень можна спостерігати його пружно-пластичну поведінку за більших навантажень).

Головні висновки і перспективи використання результатів дослідження. У короткому огляді методів проєктування й розрахунку дорожніх покриттів ми проаналізували основні, на нашу думку, проблеми та способи їх розв'язання. Використання чисельних методів розрахунку напружено-деформованого стану елементів конструкції дорожнього одягу має великі перспективи для практичного використання.

Література

1. ГБН В.2.3-37641918-557:2016. Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проєктування. Київ, 2016. 71 с.
2. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проєктування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2015. 104 с.
3. ГБН В.2.3-37641918-559:2019. Дорожній одяг нежорсткий. Проєктування. Київ, 2019. 59 с.
4. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. Vol. 1–3. Oxford, Auckland, Boston, Johannesburg, Melbourne, New Delhi, 2000. 1482 p.
5. Корочкин А.В. Элементы теории и практика повышения технико-эксплуатационных показателей жёсткой дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием : автореф. дисс. ... докт. техн. наук : 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей». Москва, 2014. 49 с.
6. Александров А.С. Развитие теоретических положений комплексного расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу и пластическому деформированию : дисс. ... докт. техн. наук : 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей». Омск, 2017. 377 с.
7. Monismith C.L. Asphalt Mixture Behaviour in Repeated Flexure. *University of California, Berkeley*, 1966. Rep. No. TE 66-6.
8. Duncan J.M., Monismith C.L., Wilson E.L. Finite Element Analyses of Pavements. *Highway Research Record*, 1968. 228. P. 18–33.
9. Мерзлякин А.Е., Капустников Н.В. Моделирование упругого однородного и двухслойного полупространства применительно к задачам по расчету дорожных одежд методом конечных элементов. *Дороги и мосты*. 2011. № 1 (25). С. 63–72.
10. Демьянушко И.В., Носов В.П., Стаин В.М., Стаин А.В. Конечноэлементные модели для расчета плиты жесткого дорожного покрытия. *Транспортное строительство*. 2012. № 4. С. 5–8.
11. Попов А.Н., Волков В.В., Хатунцев А.А., Шашков И.Г., Кочетков А.В. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния аэродромных покрытий в условиях физической нелинейности ґрунтового основания. *Вестник евразийской науки*. 2013. № 5 (18). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/108tvn513.pdf>.
12. Прогнозування та оцінка залишкових деформацій асфальтобетонного покриття з використанням методу скінченних елементів / А.М. Онищенко, С.М. Худолій, М.В. Гаркуша, О.М. Лещук. *Вісник Національного транспортного університету*. 2017. Вип. 1 (37). С. 308–320.
13. Мельникова И.С. Моделирование воздействия температуры и транспортных нагрузок на возникновение и развитие трещин в асфальтобетонных дорожных покрытиях. *Наука и техника*. 2012. № 4. С. 44–52.
14. Gupta A., Kumar A. Comparative structural analysis of flexible pavements using finite element method. *International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology*. 2014. 15 (1). P. 11–19. DOI: 10.2478/ijpeat-2013-0005.

15. Mulungye R.M., Owende P.M.O., Mellon K. Analysis of Response of Flexible Pavements Using Finite Element Method. *The ITB Journal*. 2005. 6 (2): 5. DOI: 10.21427/D71T8T.
16. Ястремский Д.А., Чепур П.В., Абайдуллина Т.Н. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния дорожного покрытия из ЩМА с применением стабилизирующей добавки «Армидон». *Фундаментальные исследования*. 2016. № 7-2. С. 277–281.
17. ОДМ 218.3.051-2015. Рекомендации по определению напряженно-деформированного состояния многослойных дорожных одежд. Отраслевой дорожный методический документ. Росавтодор. Москва, 2015. 147 с.
18. Singh A.K., Sahoo J.P. Analysis and design of two layered flexible pavement systems: A new mechanistic approach. *Computers and Geotechnics*. (2020). 117. 103238. doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103238.
19. Zheng L., Hai-lin Y., Wan-ping W., Ping C. Dynamic stress and deformation of a layered road structure under vehicle traffic loads: Experimental measurements and numerical calculations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. 39. 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.03.002>.
20. Tang F., Ma T., Guan Y., Zhang Z. Parametric modeling and structure verification of asphalt pavement based on BIM-ABAQUS. *Automation in Construction*. 2020. 111, 103066. doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103066.