

УДК 625.8:624.04
UDC 625.8:624.04

DOI:DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.1-292-301

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДІЇ СТАТИЧНОГО ТА ДИНАМІЧНОГО
НАВАНТАЖЕНЬ НА ДОРОЖНІЙ ОДЯГ**

**METHODS ANALYSIS FOR DETERMINING THE EFFECT OF STATIC AND DYNAMIC
LOADS ON ROAD PAVEMENT**



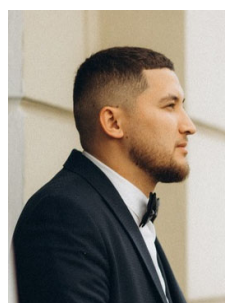
Харченко Анна Миколаївна, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, e-mail: anna-x3@ukr.net, тел. +380442807909, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 323,

<https://orcid.org/0000-0001-8166-6389>



Чечуга Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, e-mail: chchuga77@gmail.com, тел. +380662019442, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 138,

<https://orcid.org/0000-0003-1643-6354>



Алімов Акім Абкерімович, Національний транспортний університет, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, e-mail: akim.alimov.1997@gmail.com, тел. +3809994793426, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 206,

<https://orcid.org/0009-0006-5540-6173>

Анотація: Досліджено методи, які засновані на визначенні повних чи пружних деформацій при оцінюванні деформаційних характеристик дорожніх конструкцій. Визначено, що усі методи переважно відрізняються між собою способом випробовування та обладнанням; методичним підходом до оброблення отриманих даних. Зокрема, статичні методи поділяються на штампові та методи визначення статичного навантаження колесом автомобіля. Зазначено, що в останній час все більшої популярності набувають методи, що засновані на визначення динамічного навантаження на дорожній одяг, які поділяються на ударні та вібраційні. Наведено узагальнену послідовність виконання випробовувань за методами динамічного навантаження, що включає: визначення маршруту вимірювань, переміщення устаткування та встановлення його на *i*-ту точку вимірювань; підготовку устаткування до вимірювання; встановлення в робоче положення вимірювань; виконання випробовувань; збору та обробки результатів вимірювань. Визначено, що для ефективного застосування цих методів

необхідно мати дані попередніх років та просторовий розподіл навантажень; інформацію про склад транспортного потоку, швидкісні режими на ділянці; геометричні параметри та характеристики технічного стану ділянки; характеристику обраного методу для вимірювання навантажень на дорожній одяг; визначені динамічні реакції окремих складових дорожньої конструкції. Зазначено, що на точність результатів вимірювань дії динамічного навантаження можуть впливати тип підвіски транспортного засобу, тип транспортного засобу, величина навантаження на транспортний засіб, швидкість автомобіля, технічний стан дорожнього одягу, зокрема, нерівність покриття та інші фактори. Узгодження результатів випробовування дорожнього одягу методами визначення дії статичного та динамічного навантаження потребує застосування спеціальних коефіцієнтів. Запропоновано за результатами огляду методів в подальшому дослідити фактори, що впливають на точність та достовірність отриманих за ними даних.

Ключові слова: статичне навантаження, динамічне навантаження, дорожнє покриття, методи, міцність

Вступ. Однією з важливих експлуатаційних характеристик автомобільних доріг є міцність дорожнього одягу. Цей показник визначає здатність дорожнього одягу сприймати вплив заданої кількості навантажень, які створюють транспортні засоби у визначених дорожніх умовах із заданим обмеженням інтенсивності накопичення залишкової деформації. В експлуатаційній фазі автомобільної дороги визначена міцність є одним з вагомих показників, які характеризують її транспортно-експлуатаційний стан. Відповідно загальної практики визначення міцності передують оцінка дії статичного та динамічного навантажень на дорожній одяг, що може виконуватися різними методами. Метою даної публікації є узагальнення методів визначення дії статичного та динамічного навантажень на дорожній одяг як основи для визначення показника міцності.

Виклад основного матеріалу.

На сучасному етапі розвитку дорожнього господарства існує велика кількість методів визначення дії статичного та динамічного навантажень на дорожній одяг. Переважна більшість цих методів описана в роботах [1-2]. Умовно автором дослідження [1] усі методи було поділено на дві групи:

- методи, які засновані на визначенні повних чи пружних деформацій при оцінюванні деформаційних характеристик дорожніх конструкцій;
- методи, засновані на визначенні залишкових пластичних деформацій при оцінюванні стійкості дорожніх конструкцій до утворення колії.

Проте, кожна група методів має свою підгрупу, а кожен окремий метод – власну специфіку застосування. Зокрема, до методів, заснованих на визначенні повних чи пружних деформацій при оцінюванні деформаційних характеристик дорожніх конструкцій відносяться статичні, динамічні та квазістатичні групи методів (рис. 1).

Усі методи переважно відрізняються між собою двома аспектами:

- 1) способом випробовування та обладнанням;
- 2) методичним підходом до оброблення отриманих даних.

Основні вимоги до використання методів визначення дії статичного та динамічного навантажень на дорожній одяг окреслені у нормативно-технічних документах [3-7]. Зокрема, в ДСТУ Б В.2.3-42:2016 «Автомобільні дороги. Методи визначення деформаційних характеристик земляного полотна та дорожнього одягу» визначені основні методи випробовувань, рекомендовані характеристики до обладнання та послідовність застосування на практиці, а в Р В.2.3-37641918-883:2017 «Рекомендації щодо оцінювання міцності та залишкового ресурсу нежорсткого дорожнього одягу за параметрами його деформації під дією динамічного навантаження» - наведено вимоги до засобів вимірювання, періоду та місця випробовувань. Визначено, що для здійснення вимірювань з метою оцінки міцності та залишкового ресурсу нежорсткого дорожнього одягу необхідно використовувати обладнання, що складається з підсистем навантаження, реєстрації чаші прогину та допоміжного обладнання [6].



Рисунок 1 – Методи визначення дії статичного та динамічного навантажень на дорожній одяг, що засновані на визначенні повних чи пружних деформацій (адаптовано з [1]).

Figure 1 – Methods of determining the actions of static and dynamic loads on road pavement, based on the determination of total or elastic deformations (adapted from [1]).

Статичні поділяються на штампові методи та методи визначення статичного навантаження колесом автомобіля. Хоча статичні випробовування дають найбільш об'єктивні результати визначення деформаційних характеристик дорожніх конструкцій [1, 2], проте вони є доволі трудомісткими. Тому в останній час все більшої популярності набувають методи, що засновані на визначенні динамічного навантаження на дорожній одяг. Основний принцип роботи вібраційних методів полягає у визначенні параметрів деформативності дорожніх конструкцій за допомогою спеціальних датчиків та приладів під дією навантаження, яке створюється як правило напівприцепним обладнанням, що імітує проїзд транспортного засобу з певною швидкістю та визначеним навантаженням на вісь. Ударні методи випробовування дорожнього методу засновані на передачі динамічного зусилля через штамп.

Для виконання випробувань за методами динамічного навантаження необхідно притримуватися наступних етапів (рис. 2):

1. Визначити маршрут вимірювань з встановленими точками $L \in \{1; i\}$.
2. Виконати переміщення устаткування та встановити його на i -ту точку вимірювань.
3. Підготовка устаткування до вимірювання: встановлення в робоче положення.
4. Виконання випробувань.
5. Перевірка досягнення кінця маршруту за алгоритмом вимірювань. У разі недосягнення кінця маршруту повторюються пункти 2-5.
6. Збір інформації за результатами випробувань.
7. Камеральна обробка результатів вимірювань.

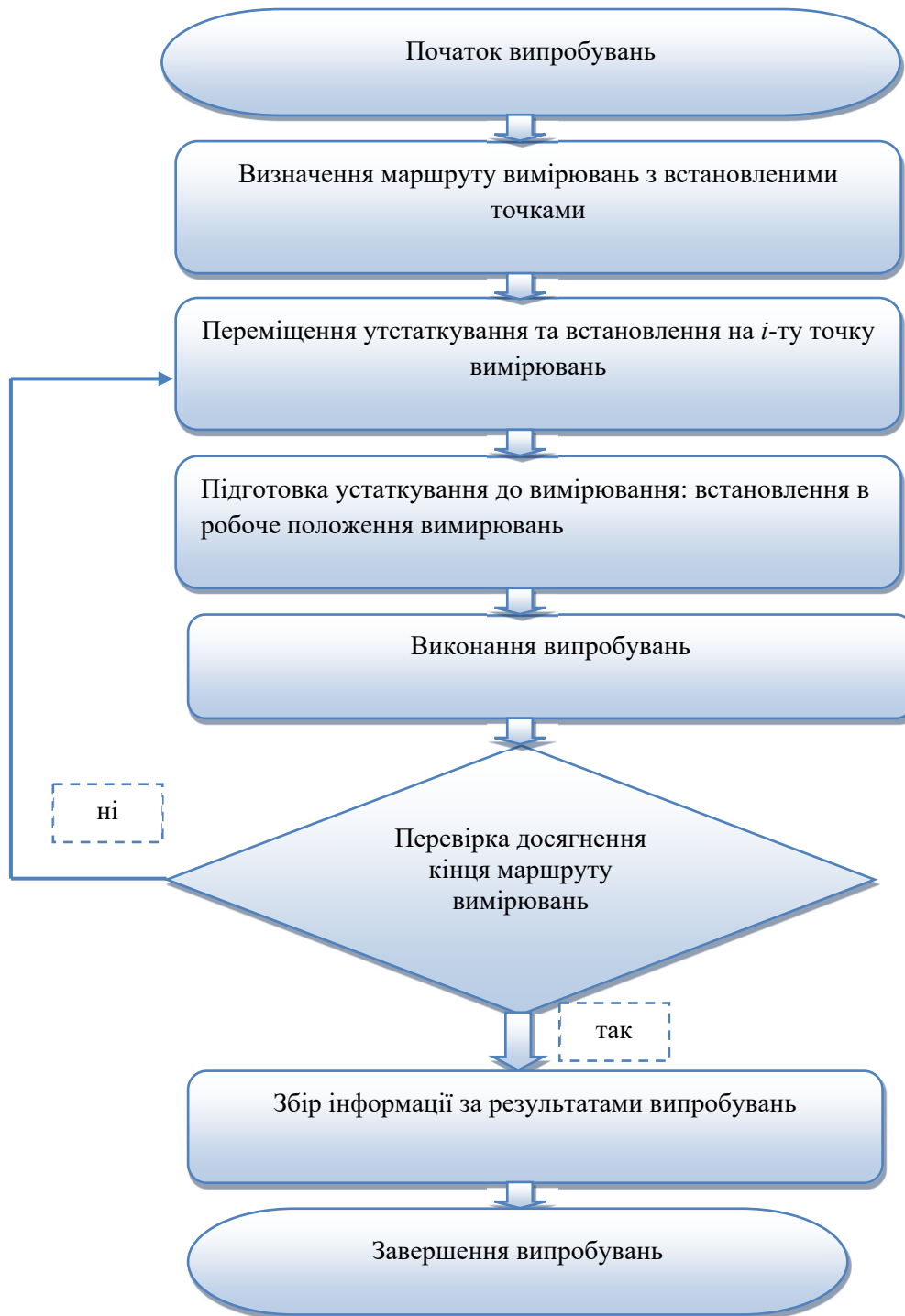


Рисунок 2 – Порядок проведення вимірювань динамічного модуля пружності (адаптовано з [8])

Figure 2 – The procedure for measuring the dynamic modulus of elasticity (adapted from [8])

Відповідно до світового досвіду ефективна оцінка дії динамічного навантаження на дорожній одяг вимагає наявності наступної інформації [9-14] (рис. 3):

1. Дані попередніх років та просторовий розподіл навантажень; інформація про склад транспортного потоку, швидкісні режими на ділянці; геометричні параметри та характеристики технічного стану ділянки.
2. Характеристика обраного методу для вимірювання навантажень на дорожній одяг.
3. Визначення динамічної реакції окремих складових дорожньої конструкції.



Рисунок 3 - Інформаційна база методів оцінки дії динамічного навантаження на дорожній одяг
Figure 3 - Information base of methods for assessing the effect of dynamic load on road pavement

На точність результатів вимірювань дії динамічного навантаження можуть впливати [9] (рис. 4):

1. Тип підвіски транспортного засобу.
2. Тип транспортного засобу.
3. Навантаження (величина навантаження на транспортний засіб, а також його центр ваги впливають на динамічну реакцію).
4. Швидкість автомобіля.
5. Технічний стан дорожнього одягу, зокрема, нерівність покриття.
6. Інші фактори, такі як тиск у шинах і їх «неокруглість», тип конструкції дорожнього одягу, умови навколишнього середовища, сезон виконання вимірювань, температура покриття тощо.

Результатом польових досліджень дорожніх конструкцій за цими методами є визначені їх деформаційні властивості, що представляються у вигляді профілю деформації поверхні покриття або так званої чаші прогину.

Відповідно до діючих нормативних документів розрахункове навантаження приймається в залежності від технічної категорії автомобільної дороги. При цьому необхідно контролювати характеристики навантаження, а саме: час дії, максимальну амплітуду, форму зміни навантаження протягом часу дії [8].

В Україні вимірювання проводяться за методикою, викладеною в ДСТУ Б В.2.3- 42:2016 Автомобільні дороги. Методи визначення деформаційних характеристик земляного полотна та дорожнього одягу [3]. При цьому граничні значення міцності приймаються на основі аналітичних розрахунків, а оцінка виконується в наступній послідовності (рис. 5) [3, 8]:

- детальне візуальне обстеження поверхні дорожнього покриття з оцінкою наявних дефектів та виділенням однорідних характерних ділянок;
- детальна оцінка міцності з використанням методу динамічного навантаження;
- камеральна обробка результатів вимірювань з введенням температурних компенсацій та приведенням значення модуля пружності до статичного.

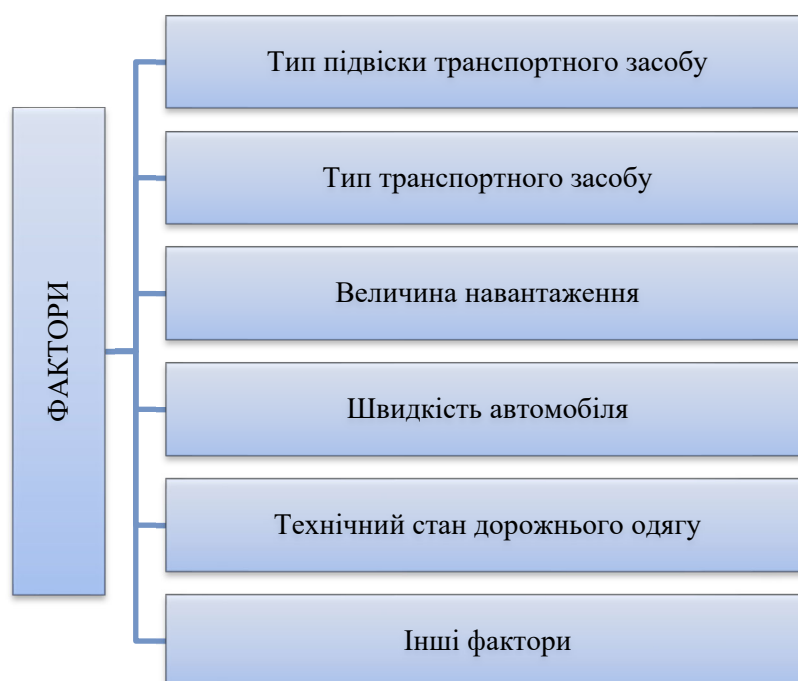


Рисунок 4 – Фактори, які впливають на точність результатів вимірювання
Figure 4 – Factors affecting the accuracy of measurement results



Рисунок 5 – Послідовність оцінки міцності дорожнього одягу
Figure 5 – The sequence of road pavement strength assessment

Для визначення достовірності результатів за наведеними методами в подальшому застосовують статистичні методи та методи математичного моделювання. В нормативно-технічній літературі при зіставленні результатів вимірювання за методами визначення дії статичного та динамічного навантажень на дорожній одяг зазвичай пропонуються спеціальні коефіцієнти або формули.

Зокрема, згідно ДСТУ Б В.2.3-42:2016 [3] значення загального модуля пружності $E_{пр}$ в поперечнику при випробовуваннях методом статичного навантаження визначається за формулою:

$$E_{\text{пр}} = \frac{K_q \cdot p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{l_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

де K_q – коефіцієнт, що залежить від характеру передачі навантаження на покриття;
 p – розрахунковий тиск на покриття, МПа;
 D – діаметр штампа, м;
 μ – коефіцієнт Пуассона;
 $l_{\text{пр}}$ – пружний прогин поверхні дорожньої конструкції, м.

Згідно з п. 8.2 Рекомендацій Р В.2.3-37641918-883:2017 [6] загальний модуль пружності дорожньої конструкції за результатами динамічних випробовувань можна визначити за формулою:

$$E_{\text{пр}} = \frac{K_q \cdot p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{D_0} \cdot K_{\text{пр}}(D_0, p), \quad (2)$$

де D_0 – вертикальна деформація в центрі навантаження, м;
 $K_{\text{пр}}$ – коефіцієнт приведення розрахованого значення загального модуля пружності за результатами динамічних випробовувань до значення загального модуля пружності при статичних випробовуваннях.

При цьому значення коефіцієнта $K_{\text{пр}}$ залежить від [6]: характеристик підсистем навантаження обладнання, що застосовується у випробуваннях; технічного стану шарів дорожньої конструкції. Функціонально значення коефіцієнта залежить від вертикальної деформації та тиску на покриття від тестового навантаження.

В закордонних дослідженнях [9] пропонується цей коефіцієнт визначати наступним чином:

$$K = \frac{Y_{dmax}}{Y_s}, \quad (3)$$

де Y_{dmax} – значення максимального динамічного навантаження;
 Y_s – значення статичного навантаження.

Проте, в тих же дослідженнях зазначається, що таке грубе формулювання залежності не має прямого застосування до дорожніх конструкцій, які за своєю сутністю є багатошаровими системами та потребують більш реального дослідження в контексті взаємодії різних шарів. Зокрема, такі дослідження є громіздкими і їх доцільно виконувати методами комп'ютерного моделювання.

Висновки.

На підставі попереднього аналізу методів визначення дії статичного та динамічного навантаження на дорожній одяг можна зробити наступні висновки та визначити перспективи майбутніх досліджень:

1. Динамічну реакцію дорожнього одягу на дію навантаження транспортних засобів, що рухаються по автомобільній дорозі, можна визначити на основі різних різноманітних методів, які відрізняються переважно схемою застосування та обладнанням. Ці методи варіюються від дуже низького до дуже високого рівня складності.

2. Методи вимірювання дії динамічного навантаження на дорожній одяг можуть бути зосередженими (статичними) або розподіленими (динамічними).

3. На точність результатів вимірювань дії динамічного навантаження можуть впливати багато факторів, зокрема тип підвіски транспортного засобу, тип транспортного засобу, величина навантаження на транспортний засіб, швидкість автомобіля, технічний стан дорожнього одягу та інші фактори, такі як тиск у шинах і їх «неокруглість», тип конструкції дорожнього одягу, умови навколишнього середовища, сезон виконання вимірювань, температура покриття тощо.

4. Узгодження результатів випробовування дорожнього одягу методами визначення дії статичного та динамічного навантаження можливе за допомогою коефіцієнтів, які можуть бути визначені експериментально.

За результатами огляду методів пропонується провести подальші наукові дослідження в напрямку визначення точності та достовірності отриманих за ними даних.

Перелік посилань

1. Шуляк І.С. Удосконалення методів випробувань дорожніх конструкцій при діагностуванні автомобільних доріг. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Київ: НТУ, 2018. – 245 с.
2. Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2024). Pavement design and materials. John Wiley & Sons. 542 p.
3. ДСТУ Б В.2.3-42:2016 Автомобільні дороги. Методи визначення деформаційних характеристик земляного полотна та дорожнього одягу; Введ. 01.07.2016. – Київ, 2016. – 40 с.
4. СОУ 45.2-00018112-042:2009 Автомобільні дороги. Визначення транспортно-експлуатаційних показників дорожніх одягів. – На заміну ГСТУ 218-02070915-102-2003; Введ. 01.08.09. – Київ: Укравтодор, 2009. – 46 с.
5. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво.
6. Р В.2.3-37641918-883:2017 Рекомендації щодо оцінювання міцності та залишкового ресурсу нежорсткого дорожнього одягу за параметрами його деформації під дією динамічного навантаження; Введ. 18.01.2018. – Київ: 2018. – 21 с.
7. ВБН В.2.3-218-186-2004 Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу. Введ. 18.01.2018. – Київ: 2004. – 176 с.
8. Звіт про надання послуг щодо оцінки загальної міцності існуючої дорожньої конструкції автомобільної дороги М-04 на ділянках: км 0+000 – км 2+500; км 216+384 – км 279+693 (окремими ділянками) в межах Дніпропетровської області. Київ: ДП «Дорцентр», 2021. – 153 с.
9. Sousa, J. B., Lysmer, J., Chen, S. S., & Monismith, C. L. (1988). Effects of dynamic loads on performance of asphalt concrete pavements. Transportation Research Record, (1207). URL: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1988/1207/1207-014.pdf>
10. Papagiannakis, T., Haas, R. C. G., Woodrooffe, J. H. F., & Leblanc, P. A. (1988). Effects of dynamic loads on flexible pavements. Transportation Research Record, (1207). URL: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1988/1207/1207-017.pdf>
11. Šiaudinis, G. 2006. Relationship of Road Pavement Deformation Moduli, Determined by Different Methods, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 1(2): 77–81.
12. Šiaudinis, G; Čygas, D. 2007. Determination of Seasonal Effects on the Structural Strength of Asphalt Pavements, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 2(2): 67–72.
13. Talvik, O; Aavik, A. 2009. Use of FWD Deflection Basin Parameters (SCI, BDI, BCI) for Pavement Condition Assessment, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 4(4): 196– 202. <http://dx.doi.org/10.3846/1822-427X.2009.4.196-202>
14. Vaitkus, A.; Čygas, D.; Laurinavičius, A. 2005. Analysis and Evaluation of Determination Methods of Non-Rigid Pavement Structures Deformation Modulus, in Proc. of the 6th International Conference “Environmental Engineering”: selected papers, vol. 2. Ed. by Čygas, D.; Froehner, K. D. May 26–27, 2005, Vilnius, Lithuania. Vilnius, Technika: 792–795.

METHODS ANALYSIS FOR DETERMINING THE EFFECT OF STATIC AND DYNAMIC LOADS ON ROAD PAVEMENT

Anna Kharchenko, Sc.D., Professor, National Transport University, Professor of Transport Construction and Property Management Department, e-mail: anna-x3@ukr.net, tel. +380442807909, Ukraine, 01010, Kyiv, Omelyanovich Pavlenko str. 1, of. 323, <https://orcid.org/0000-0001-8166-6389>

Oleksand Chechuha, Candidate of Engineering Science (Ph.D.), Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of Department of Transport Construction and Property Management, e-mail: chechuga77@gmail.com, tel. +380662019442, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovycha-Pavlenka Str., 1, office 138. <https://orcid.org/0000-0003-1643-6354>

Akim Alimov, National Transport University, Postgraduate student of Department of Transport Construction and Property Management, e-mail: akim.alimov.1997@gmail.com, tel. +3809994793426, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovycha-Pavlenka Str., 1, office 206, <https://orcid.org/0009-0006-5540-6173>

Summary. The methods based on the determination of total or elastic deformations in the evaluation of the deformation characteristics of road structures have been studied. It was determined that all methods mainly differ among themselves in the way of testing and equipment; a methodical approach to processing the received data. In particular, static methods are divided into stamping and methods of determining the static load of a car wheel. It is noted that methods based on determining the dynamic load on road pavement, which are divided into shock and vibration, are becoming more and more popular recently. The generalized sequence of performing tests using dynamic load methods is presented, which includes: determining the measurement route, moving the equipment and setting it to the i-th measurement point; preparation of the equipment for measurement: installation in the working position of extinctions; execution of tests; collection and processing of measurement results. It was determined that for effective suction of these methods, it is necessary to have historical data and spatial distribution of loads; information on the composition of the traffic flow, speed regimes on the site; geometric parameters and characteristics of the technical condition of the site; characteristics of the chosen method for measuring loads on road pavement; dynamic reactions of individual components of the road structure are determined. It is noted that the accuracy of the results of dynamic load measurements can be affected by the type of vehicle suspension, vehicle type, amount of load on the vehicle, vehicle speed, technical condition of the road surface, in particular, the unevenness of the surface and other factors. Reconciliation of the results of testing road pavement by methods of determining the action of static and dynamic load requires the use of special coefficients. Based on the results of the review of the methods, it is proposed to further investigate the factors affecting the accuracy and reliability of the data obtained by them.

Keywords: static load, dynamic load, road pavement, methods, strength

References

1. Shuliak I.S. Udoskonalennia metodiv vyprobuvan dorozhnikh konstrukttsii pry diahnostuvanni avtomobilnykh dorih. – Kvalifikatsiina naukova pratsia na pravakh rukopysu. Kyiv: NTU, 2018. – 245 s. [in Ukrainian]
2. Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2024). Pavement design and materials. John Wiley & Sons. 542 p. [in English]
3. DSTU B V.2.3-42:2016 Avtomobilni dorohy. Metody vyznachennia deformatsiinykh kharakterystyk zemlianooho polotna ta dorozhnooho odiahu; Vved. 01.07.2016. – Kyiv, 2016. – 40 s. [in Ukrainian]

4. SOU 45.2-00018112-042:2009 Avtomobilni dorohy. Vyznachennia transportno-eksploatatsiinykh pokaznykiv dorozhnikh odiahiv. – Na zaminu HSTU 218-02070915-102-2003; Vved. 01.08.09. – Kyiv: Ukravtodor, 2009. – 46 s. [in Ukrainian]
5. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo. [in Ukrainian]
6. R V.2.3-37641918-883:2017 Rekomendatsii shchodo otsiniuvannia mitsnosti ta zalyshkovoho resursu nezhorstkoho dorozhnoho odiahu za parametry yoho deformatsii pid diieiu dynamichnoho navantazhennia; Vved. 18.01.2018. – Kyiv: 2018. – 21 s. [in Ukrainian]
7. VBN V.2.3-218-186-2004 Sporudy transportu. Dorozhnii odiah nezhorstkoho typu. Vved. 18.01.2018. – Kyiv: 2004. – 176 s. [in Ukrainian]
8. Zvit pro nadannia posluh shchodo otsinky zahalnoi mitsnosti isnuiuchoi dorozhnoi konstruktsii avtomoblnoi dorohy M-04 na diliankakh: km 0+000 – km 2+500; km 216+384 – km 279+693 (okremymy diliankaamy) v mezhakh Dnipropetrovskoi oblasti. Kyiv: DP «Dortsentr», 2021. – 153 s. [in Ukrainian]
9. Sousa, J. B., Lysmer, J., Chen, S. S., & Monismith, C. L. (1988). Effects of dynamic loads on performance of asphalt concrete pavements. *Transportation Research Record*, (1207). URL: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1988/1207/1207-014.pdf> [in English]
10. Papagiannakis, T., Haas, R. C. G., Woodrooffe, J. H. F., & Leblanc, P. A. (1988). Effects of dynamic loads on flexible pavements. *Transportation Research Record*, (1207). URL: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1988/1207/1207-017.pdf> [in English]
11. Šiaudinis, G. 2006. Relationship of Road Pavement Deformation Moduli, Determined by Different Methods, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 1(2): 77–81. [in English]
12. Šiaudinis, G; Čygas, D. 2007. Determination of Seasonal Effects on the Structural Strength of Asphalt Pavements, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 2(2): 67–72. [in English]
13. Talvik, O; Aavik, A. 2009. Use of FWD Deflection Basin Parameters (SCI, BDI, BCI) for Pavement Condition Assessment, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 4(4): 196–202. <http://dx.doi.org/10.3846/1822-427X.2009.4.196-202> [in English]
14. Vaitkus, A.; Čygas, D.; Laurinavičius, A. 2005. Analysis and Evaluation of Determination Methods of Non-Rigid Pavement Structures Deformation Modulus, in *Proc. of the 6th International Conference “Environmental Engineering“: selected papers, vol. 2. Ed. by Čygas, D.; Froehner, K. D. May 26–27, 2005, Vilnius, Lithuania. Vilnius, Technika: 792–795. [in English]*