

УДК 625.8:624.04
UDK 625.8:624.04

DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.2-170-179

**ОЦІНЮВАННЯ НЕСНОЇ ЗДАТНОСТІ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ З ВИКОРИСТАННЯМ
УСТАТКУВАННЯ FFWD МЕТОДОМ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

**EVALUATION OF THE ROAD PAVEMENT BEARING CAPACITY USING FFWD EQUIPMENT
BY THE METHOD OF DYNAMIC LOADING**



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 метод оцінювання несної здатності дорожніх одягів методом динамічного навантаження з використанням устаткування дефлектометра швидкого падіння ваги (Fast-Falling-Weight-Deflectometer – FFWD). Визначено, що використання устаткування FFWD забезпечує прискорений збір даних та їх швидку обробку, у порівнянні з попередніми версіями установок з дефлектомерами чи аналогами. Повторюваність тесту за методом FFWD забезпечує надійність отриманих результатів вимірювань, зокрема, стандартний тест виконується тричі з однаковим навантаженням або через прогресуючий імпульс із зростаючим навантаженням. Результатом польових вимірювань міцності дорожніх одягів за методом FFWD є отримання їх деформаційних характеристик, які у спеціалізованому програмному забезпеченні представляються у вигляді профілю деформації поверхні покриття (чаші прогину). Обрис чаші прогину формується за точками розташування датчиків

реєстрації вертикального переміщення поверхні (геофонами), що встановлюються в лінію вздовж смуги руху оптимальною кількістю у дев'ять одиниць. Аналіз отриманих даних щодо деформації поверхні покриття методом FFWD дає змогу визначити потенційно слабкі місця у дорожній конструкції. В свою чергу, це є передумовою для планування заходів з посилення або відновлення дорожніх конструкцій, а також є основою для економічного обґрунтування обсягу фінансування цих робіт. Метод FFWD ще потребує додаткової апробації в умовах України, тому подальші дослідження стосуватимуться практичного застосування методу в сучасних умовах.

Ключові слова: динамічне навантаження, дорожнє покриття, дорожній одяг, метод FFWD, несна здатність, чаша прогину.

Вступ.

Останнім часом у дорожньому господарстві багатьох європейських країн та США стрімко розвиваються методи оцінювання несної здатності дорожніх одягів з використанням сучасного устаткування. Особливого поширення набуло оцінювання несної здатності дорожніх одягів не руйнівними методами, а саме методом динамічного навантаження. Аналіз останніх закордонних публікацій [1-2] підтверджує, що цей метод набуває все більшого розповсюдження, оскільки він зарекомендував себе як більш точний у порівнянні з існуючими методами, таким чином підтверджується актуальність даного дослідження. В Україні метод FFWD був апробований ДП «Дорцентр». Проте, результати апробації цього методу ще потребують певного наукового осмислення та розробки ефективних рішень щодо управління станом дорожніх одягів на його основі. Отже, метою даного дослідження є аналіз методу оцінювання несної здатності дорожніх одягів методом динамічного навантаження з використанням устаткування Fast-Falling-Weight-Deflectometer (FFWD).

Виклад основного матеріалу.

Метод Falling-Weight-Deflectometer (FWD) був розроблений на основі «Deflectmetre a Boulet» компанією Bretonniere в 1963 році. Імпульс сили прикладається до поверхні дороги за допомогою спеціально розробленої системи навантаження, яка представляє собою динамічне короткочасне навантаження колеса. Це створює ударне навантаження тривалістю 25-30 мс із піковою силою до 120 кН. Величина чаші прогину дорожнього одягу вимірюється набором від 7 точних геофонів на різних відстанях від прикладеного навантаження [3].

За час використання цього методу було зроблено висновок, якщо чашу прогину виміряти за допомогою тесту FWD, а потім використати теорію пружності для визначення модулів окремих шарів, які створюють ту саму чашу прогину, то модулі результуючого шару будуть репрезентативними для матеріалів покриття під дією навантаження від транспортного потоку [3].

Точність вимірювань методом FWD додатково забезпечується проведенням вимірювань два-три рази в кожній точці для оцінки похибки вимірювань. Це дозволяє оцінити вплив різних навантажень і визначити різні зовнішні фактори, такі як проїжджаючі транспортні засоби, які могли б вплинути на результати [3].

Пізніше метод FWD був удосконалений, таким чином на його базі було створено метод оцінювання несної здатності дорожніх одягів за допомогою дефлектометра швидкого падіння ваги (Fast-FWD). Зокрема, в США використання методу Fast-FWD для оцінки значень міцності конструкції дорожнього покриття було запроваджено наприкінці 1970-х років [2].

Устаткування FFWD обладнане пневматичними або електричними приводами, а не гідравлічними, що робить механізм використання методу в кілька разів швидшим [4].

Використання методу FFWD на практиці передбачає виконання вимірювань за допомогою пересувної дорожньої лабораторії у складі (рис. 1):

- устаткування для оцінки міцності за методом FFWD на базі одновісного причепу (наприклад, Dynatest FFWD 8012-002, рис. 2);
- автомобіля-тягача.



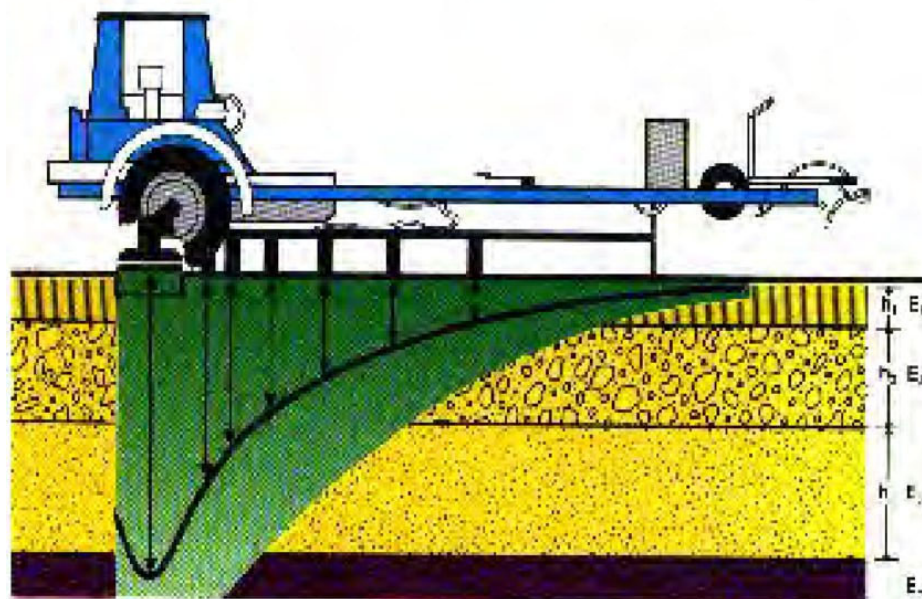
Рисунок 1 – Загальний вигляд пересувної дорожньої лабораторії з устаткуванням FFWD
Figure 1 - General view of the mobile road laboratory with FFWD equipment



Рисунок 2 – Устаткування для оцінки міцності за методом FFWD [5]
Figure 2 - Equipment for strength assessment by the FFWD method [5]

Вага та висота падіння маси, що падає, може бути змінена: діапазон ваги становить 50–350 кг, а висота падіння становить від 50 до 390 мм, тому імпульсне навантаження може коливатися від 40 до 120 кН. Тривалість імпульсного навантаження коливається від 25 до 30 мс. Для кожного падіння система вимірює навантаження та вимірює зміну прогину протягом 60 мс. Навантаження прикладається вантажем, що падає, з фіксованим перепадом висоти та перевіряється за допомогою динамометра. Вид покриття може впливати на місцевий тиск, але осьове навантаження буде постійним [2].

Стандартне тестове випробування включає три повторних падіння з однаковим навантаженням або через прогресуючий імпульс із зростаючим навантаженням (рис.3).



h_1, h_2, h_3 – товщини шарів дорожнього одягу;
 E_1, E_2, E_3 – модулі пружності шарів дорожнього одягу;
 $E_{гр}$ – модуль пружності земляного полотна.

Рисунок 3 – Схема оцінки міцності за методом FFWD [5]

h_1, h_2, h_3 – thickness of road pavement layers;
 E_1, E_2, E_3 – modules of elasticity of road pavement layers;
 $E_{гр}$ – subgrade elasticity module.

Figure 3 – Strength assessment scheme using the FFWD method [5]

Визначення несної здатності за методом FFWD на базі одновісного причепа Dynatest FFWD 8012-002 в Україні виконується відповідно до ДСТУ Б В.2.3-42:2016. Цей метод є досить швидкий та точний, що в свою чергу в повному обсязі задовільняє вимоги кількості поперечників, в яких потрібно отримати значення модулів пружності згідно з п.4.1.3 [6]. Теоретична база дослідження докладно наведена в джерелі [4].

За допомогою спеціального програмного забезпечення (в даному випадку Dynatest Data Collection від компанії Dynatest) проведення вимірювань модуля пружності методом FFWD також можливе і в нерозрахунковий період. Dynatest Data Collection (DDC) – це програма збору даних, яка використовується з додатковим обладнанням Dynatest.

Результатом польових досліджень дорожніх конструкцій за методом FFWD є отримання їх деформаційних властивостей, які будуть представлені у вигляді профілю деформації поверхні покриття або так званої «чаші прогину». Обрис чаші прогину формується за точками, положення яких в плані залежить від положення датчиків реєстрації вертикального переміщення поверхні (геофонами). Датчики розташовують в лінію вздовж смуги руху. Оптимальна кількість датчиків, що задовольняє необхідну точність вимірювання геометрії чаші прогину, складає дев'ять одиниць. Схема встановлення датчиків відповідно до рекомендацій виробника обладнання [5] передбачає наступні відстані від центру прикладання навантаження: 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 та 1800 мм (рис. 4). Ці відстані формують характерні точки $D \in [D_1; D_n], n = 9$.

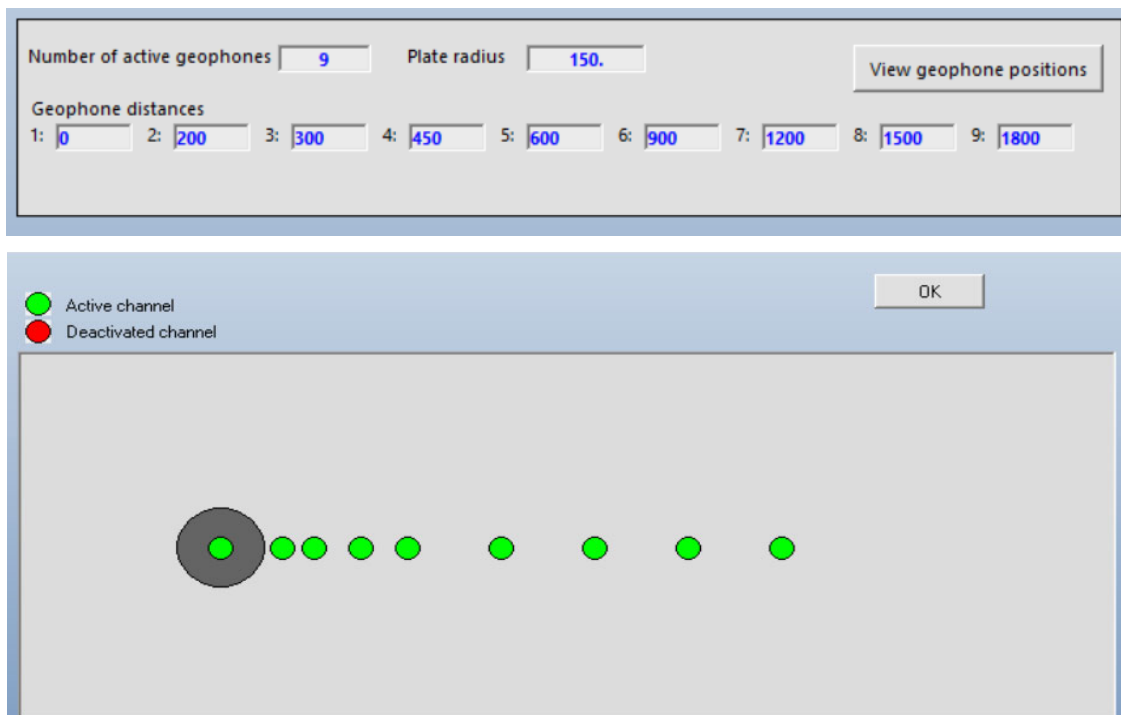


Рисунок 4 – Схема встановлення датчиків за методом FFWD [8]
Figure 4 – Sensor installation diagram using the FFWD method [8]

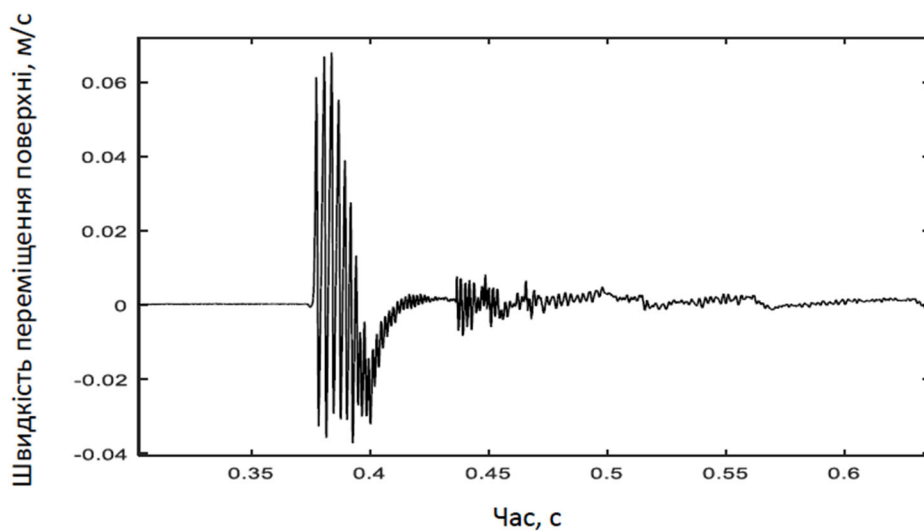


Рисунок 5 – Закономірність зміни швидкості переміщення поверхні покриття під дією тестового навантаження, приклад за даними [8]

Figure 5 – Regularity of change in the speed of movement of the pavement surface under the action of the test load, simple using data [8]

Перший датчик розташовується в центрі прикладання навантаження та призначений для реєстрації максимального значення прогину. Відстань до другого датчика обумовлена діаметром індентору та його великою згинальною жорсткістю, що робить вимірювання на меншій відстані не доцільними. Подальше збільшення відстані між наступними датчиками пов'язане з поступовим затуханням деформації та зменшенням значень першої похідної функції прогину поверхні з віддаленням від центру прикладання навантаження. Максимальна відстань до дев'ятого датчика забезпечує перекриття переважної більшості радіусів динамічних чаш прогину з урахуванням точності реєструвальної апаратури [8].

Результатом реєстрації датчиками вертикального переміщення є часова залежність швидкості деформації поверхні покриття під дією тестового навантаження (приклад на рис. 5). Таким чином, за наслідком опрацювання результатів польових досліджень можна отримати закономірність деформації поверхні покриття в точці встановлення датчиків (приклад на рис. 6) [8].

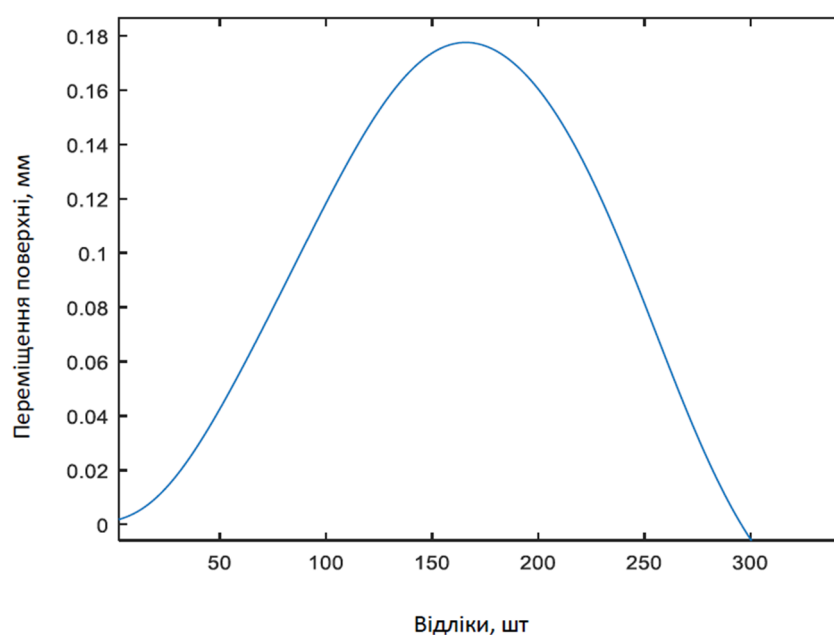


Рисунок 6 – Закономірність деформації поверхні покриття під дією тестового навантаження, приклад за даними [8]

Figure 6 – Pattern of pavement surface deformation under test load, simple using data [8]

Апроксимація функції з однією змінною за графіком закономірності деформації поверхні покриття в точці встановлення датчиків (рис. 6) дозволяє у подальшому визначити характер функції, за даним прикладом це квадратична регресія:

$$y = -0.00001157x^2 + 0.0036x - 0.125. \quad (1)$$

При цьому, розрахований за допомогою вбудованих функцій MS Excel коефіцієнт кореляції, складає $r = 0.96891243$; коефіцієнт детермінації $D = 0.93879129$. Такі показники свідчать про позитивну оцінку та високу залежність між аналізованими змінними.

Результатом польових вимірювань за методом динамічного навантаження FWD є чаша прогину в тестових точках – типова хмара точок значень відхилення, виміряних геофонами після імпульсного навантаження (рис. 7), за результатами обробки якої визначається динамічний модуль пружності. На профіль прогину впливають властивості шарів дорожнього покриття, а також величина

та частота навантаження [2]. При цьому, значення жорсткості можна отримати шляхом ділення прикладеного навантаження на отримане переміщення, виміряне осьовим геофоном D_0 [2]:

$$K = \frac{F}{D_0}, \quad (2)$$

де F — імпульсне навантаження;
 D_0 — максимальний прогин, виміряний у центрі.

Крім того, аналіз форми чаші прогину дає можливість визначити так звані «індекси прогину» або «індекси басейну».



Рисунок 7 – Чаша прогину, яка побудована за результатами вимірювань методом FFWD (зразок)

Figure 7 – Deflection basin constructed from the results of FFWD measurements (sample)

Радіус кривизни (RC) визначає середній радіус кривизни чаші прогину. Індекс стану поверхні (SCI), індекс опору (BDI) та індекс стану глибини (DCI) визначаються як різниця прогину на різних відстанях від точок навантаження. Індикатор прямокутної площі (RA) є синтетичним показником, який розглядає суму всіх переміщень, пов'язаних з D_i відповідно до [2]:

$$RC = \frac{R^2}{2 \cdot (D_0 - D_{200})}, \quad (3)$$

$$SCI = D_0 - D_{300}, \quad (4)$$

$$BDI = D_0 - D_{600}, \quad (5)$$

$$DCI = D_{900} - D_{1800}, \quad (6)$$

$$RA = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{D_1}, \quad (7)$$

де R — радіус штампа, через який передається навантаження;
 D_i — відхилення i -го датчика.

Результати польових вимірювань методом FFWД зводяться у таблиці відомостей чаші прогинів та модулів пружності, які містять в собі ряд наступних показників (табл. 1):

- $E_{дин}$ – динамічний модуль пружності отриманий після випробування установкою FFWД;
- $E_{стат}$ – корегований модуль пружності відповідно до статичних випробувань;
- $E_{ф}$ – фактичний загальний модуль пружності характерної ділянки після випробування установкою FFWД.

Таблиця 1 – Відомість чаш прогинів та модулів пружності на ділянці (зразок) [8]

Table 1 – List of basin deflections and elastic moduli on the roadside (sample) [8]

Прив'язка	ρ , кПа	Прогин, мм									$E_{дин}$, МПа	$E_{стат}$, МПа	$E_{ф}$, МПа
		D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9			
1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
235,4	600	271	213	180	155	135	99	75	58	43	604	408	402
235,516	600	350	278	200	148	121	79	59	49	39	468	316	360
235,605	600	208	149	118	95	80	63	54	44	36	788	532	682
235,701	600	364	279	224	176	147	105	76	58	45	450	304	390
235,8	600	270	175	113	87	82	72	62	53	48	607	410	526
235,81	600	302	263	142	86	76	60	51	40	36	542	366	470
235,894	600	139	94	86	77	70	60	51	45	38	1178	796	1021
236,001	600	181	131	103	88	77	64	57	47	39	905	611	784
236,1	600	324	269	220	159	125	85	64	50	42	506	342	438
236,202	600	251	195	162	138	118	92	73	60	51	653	441	565
236,307	600	348	249	163	122	110	87	68	55	42	471	318	408

Аналіз отриманих даних методом FFWД дає змогу визначити потенційно слабкі місця у дорожній конструкції, що в свою чергу є передумовою до прийняття раціонального рішення щодо її утримання чи посилення, а також є основою для економічного обґрунтування фінансових витрат на проведення цих робіт.

Висновки.

Проведене дослідження процесу оцінювання несної здатності дорожніх одягів з використанням устаткування FFWД методом динамічного навантаження дозволило зробити висновки, що метод Fast-Falling-Weight-Deflectometer є достойною альтернативою існуючим методам та дозволяє здійснювати швидкі, точні та економічно ефективні оцінки міцності дорожніх одягів із мінімальним впливом на транспортний потік. Подальші дослідження цього підходу мають бути орієнтовані на оцінювання потенціалу методу Fast-FWD у практиках оцінки різних типів дорожніх покриттів та конструкцій.

Перелік посилань

1. Giuntoli, S., Pratelli, C., Betti, G., & Marradi, A. (2018, May). Field performance evaluation of unbound granular materials using the Fast Falling Weight Deflectometer. In Proceedings of the 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2018), Zadar, Croatia (pp. 17-19).
2. Coni, M., Mistretta, F., Stochino, F., Rombi, J., Sassu, M., & Puppio, M. L. (2021). Fast falling weight deflectometer method for condition assessment of RC bridges. Applied Sciences, 11(4), 1743. <https://doi.org/10.3390/app11041743>
3. Falling Weight Deflectometer. URL: <https://www.pavementanalysis.com/falling-weight-deflectometer>
4. Falling weight deflectometer. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Falling_weight_deflectometer
5. Dynatest: 8012 Fast Falling Weight Deflectometer. URL: <https://pdf.aeroexpo.online/pdf/dynatest/8012-fast-falling-weight-deflectometer/172481-19158.html>
6. 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.
7. Харченко А.М., Чечуга О.С., Алімов А.А. Аналіз методів визначення дії статичного та динамічного навантажень на дорожній одяг. Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво», 2024. Випуск 115. Частина 1. С.292-301. DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.1-292-301
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.

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: chchuga77@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 method of assessing the bearing capacity of road surfaces by the dynamic loading method using the Fast-Falling-Weight-Deflectometer (FFWD) equipment was investigated. It was determined that the use of FFWD equipment provides accelerated data collection and their rapid return, if compared with previous versions of installations with deflectometers or analogues. The repeatability of the test using the FFWD method ensures the reliability of the obtained results, in particular, the standard test is performed three times with the same load or through a progressive pulse with increasing load. The result of field measurements of the strength of road surfaces using the FFWD method is to obtain their deformation characteristics, which are presented in the form of a profile of the surface deformation (deflection basin) in specialized software. The outline of the deflection basin is formed by the location points of the sensors for registering vertical surface movement (geophones), which are installed in a line along the traffic lane in an optimal number of nine units. Analysis of the obtained data on the deformation of the pavement surface by the FFWD method allows to identify potential weak points in the road structure. In turn, this is a prerequisite for planning measures to strengthen or restore road structures, and is also the basis for economically calculating the amount of financing

for these works. The FFW method still requires additional testing in Ukrainian conditions, so further research will concern the practical application of the method in modern conditions.

Keywords: dynamic loading, road surface, FFW method, deflection basin

References

1. Giuntoli, S., Pratelli, C., Betti, G., & Marradi, A. (2018, May). Field performance evaluation of unbound granular materials using the Fast Falling Weight Deflectometer. In Proceedings of the 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2018), Zadar, Croatia (pp. 17-19). [in English]
2. Coni, M., Mistretta, F., Stochino, F., Rombi, J., Sassu, M., & Puppio, M. L. (2021). Fast falling weight deflectometer method for condition assessment of RC bridges. Applied Sciences, 11(4), 1743. <https://doi.org/10.3390/app11041743> [in English]
3. Falling Weight Deflectometer. URL: <https://www.pavementanalysis.com/falling-weight-deflectometer> [in English]
4. Falling weight deflectometer. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Falling_weight_deflectometer [in English]
5. Dynatest: 8012 Fast Falling Weight Deflectometer. URL: <https://pdf.aeroexpo.online/pdf/dynatest/8012-fast-falling-weight-deflectometer/172481-19158.html> [in English]
6. 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]
7. Kharchenko A.M., Chechuha O.S., Alimov A.A. Analiz metodiv vyznachennia dii statychnoho ta dynamichnooho navantazhen na dorozhnii odiah. Naukovyi zhurnal «Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo», 2024. Vypusk 115. Chastyna 1. S.292-301. DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.1-292-301. [in Ukrainian]
8. Zvit pro nadannia posluh shchodo otsinky zahalnoi mitsnosti isnuiuchoi dorozhnoi konstruktсии 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]