

**Кіяшко І.В.**, канд. техн. наук, **Новаковський Д.М.**, канд. техн. наук, **Смолянук Р.В.** канд. техн. наук, **Мінаков О.С.**, **Пархоменко О.Ю.**, **Буркун В.І.**

## **ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕСТОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ВИМІРЮВАННІ МІЦНОСТІ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ДИНАМІЧНИМИ МЕТОДАМИ**

**Анотація.** У статті виконано аналіз методів та устаткування з визначення міцності конструкції дорожнього одягу. Описано функціональну схему експериментального зразка устаткування ХНАДУ. Представлено розрахунки параметрів системи тестового навантаження.

**Ключові слова:** конструкція дорожнього одягу, міцність, динамічне навантаження.

**Аннотация.** В статье выполнен анализ методов и оборудования по определению прочности конструкции дорожной одежды. Описано функциональную схему экспериментального образца оборудования ХНАДУ. Представлены расчеты параметров системы тестового нагружения.

**Ключевые слова:** конструкция дорожной одежды, прочность, динамическая нагрузка.

**Annotation.** The article analyzes the methods and equipment for highway structural strength estimations. Describes the functional diagram of operative embodiment of KNAHU equipment. Presents the estimations of test loads system parameters.

**Key words:** highway structure, strength, dynamic load.

Якісна діагностика автомобільних доріг є запорукою ефективного функціонування дорожньо-транспортної системи. Вплив якості функціонування діагностичної галузі дорожнього господарства ще більш критично проявляється в умовах обмеженого фінансування. Мета діагностики і оцінки стану автомобільних доріг полягає в отриманні повної, об'єктивної і достовірної

інформації про транспортно-експлуатаційний стан доріг. Необхідним інструментом для досягнення позначеної мети є автоматизовані технічні засоби діагностики і оцінки транспортно-експлуатаційного стану доріг, у тому числі для оцінки показників несучої здатності дорожніх конструкцій.

Міцність дорожніх конструкцій є основним показником транспортно-експлуатаційного стану від якого залежать рівність покриттів, працездатність, надійність автомобільних доріг. Під міцністю дорожнього одягу розуміють його здатність під дією багаторазових транспортних навантажень та кліматичних впливів зберігати необхідну суцільність і потрібну рівність протягом заданого терміну служби. Теоретичні і експериментальні дослідження показали, що в більшості випадків міцність дорожнього одягу достатньо повно може бути охарактеризована величиною його пружного прогину під навантаженням. Прогин, виміряний на поверхні дорожнього покриття, є найбільш інформативним показником загального стану дорожнього одягу, оскільки він до того ж побічно характеризує стискаючі напруження та напруження зсуву в шарах дорожнього одягу. Широкому використанню величини пружного прогину як показника міцності дорожнього одягу сприяло і те, що цей показник досить просто визначати в польових умовах.

Методи визначення міцності дорожніх конструкцій, які на даний час використовуються в Україні, мають низку недоліків серед яких наступні: вимірювання пружного прогину виконується в тестових точках, не виконується визначення несучої здатності окремих конструктивних елементів дорожньої конструкції, низька продуктивність, висока трудоемність, складність в калібруванні обладнання, висока вартість устаткування (особливо закордонного виробництва).

Серед параметрів деформації, що оцінюються за різними методами, можна виділити такі як:

- величини максимального пружного, повного та залишкового прогинів конструкції дорожнього одягу;
- показники геометрії чаші пружного, повного та залишкового прогинів в тестових точках з подальшим відновленням безперервного профілю чаші прогину;
- часові залежності прогинів та геометрії чаші прогину.

За типом тестового навантаження методи прийнято поділяти на динамічні, статичні та квазістатичні. Серед методів, що використовують

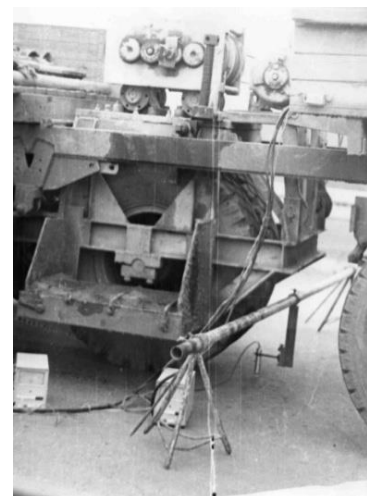
динамічне навантаження необхідно відокремити методи ударного та рухомого навантаження. Крім часу дії тестового навантаження необхідно враховувати також характер передачі дії на дорожню конструкцію. Так передача навантаження може здійснюватися через різні конструкції штампів та імітаторів, та через реальні пневматики ходових лабораторій та причіпного устаткування.

Для більш об'єктивної оцінки міцності дорожнього одягу доцільно використовувати дію, аналогічну тій, що виникає при русі автомобільного транспорту. Аналіз напружено-деформованого стану конструкції під дією динамічного навантаження буде більш інформативним з позиції визначення здатності дорожньої конструкції сприймати динамічну дію автомобілів. На відміну від статичних підходів, динамічні моделі напружено-деформованого стану теоретично здатні врахувати ефекти, обумовлені рухливістю навантаження.

Однією з перших установок динамічного навантаження в Радянському союзі була створена установка ХАДІ (рис. 1). На відміну від багатьох сучасних приладів в установці ХАДІ використовувалась схема навантаження на покриття через реальний пневматик. Установка дозволяла виконувати випробування в умовах як статичного навантаження так і в умовах циклічного та ударного навантаження з можливістю реєстрації параметрів чаші прогину. Найбільше розповсюдження в Україні отримали установки динамічного навантаження типів Діна-3М та УДВО-НТУ.



а)



б)

**Рисунок 1** – Установка динамічного навантаження ХАДІ: а) загальний вигляд; б) обладнання для реєстрації переміщення поверхні покриття

З позиції інформативності, надійності, простоти реалізації, продуктивності, вартості обладнання, прийнятої схеми навантаження та інших показників метод визначення несучої здатності дорожньої конструкції за параметрами її прогину під дією імпульсного навантаження (в міжнародній класифікації – Failing Weight Deflectometer або FWD) значно перевершує статичні та квазістатичні методи. Серед найбільш відомих світових виробників таких комплексів слід відмітити компанії JLS, Grontmij (в минулому CarlBro), ERES International, Dynatest. Для практичної реалізації методу використовуються автоматизовані та напівавтоматизовані вимірювальні комплекси змонтовані, найчастіше на одно або двовісних візках, що транспортуються до місця випробування за допомогою транспортних засобів.

Прагнення реалізації перспектив інтеграції дорожньо-транспортної системи України в Європейський простір вимагають доведення апаратної бази національного діагностичного комплексу до найвищих світових стандартів. Ідея розробки національного обладнання для вимірювання і оцінки міцності дорожніх одягів за міжнародними стандартами знайшла підтримку в Державному агентстві автомобільних доріг України. Розробка такого обладнання за типом FWD виконується співробітниками Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Ефективний підхід до створення інноваційних зразків наукоємного обладнання передбачає розробку детальної функціональної схеми такого обладнання, що дає можливість виконати аналіз подальших конструктивних рішень на етапі проектування, раціонально підійти до підбору та обґрунтування параметрів компонентів, мінімізувати похибки та зменшити трудомісткість конструкторської роботи. Згідно з технічним завданням та загальною концепцією експериментального зразка устаткування для визначення жорсткості дорожніх конструкцій з використанням інструменту системного проектування виконано розробку загальної функціональної схеми (рис. 2).

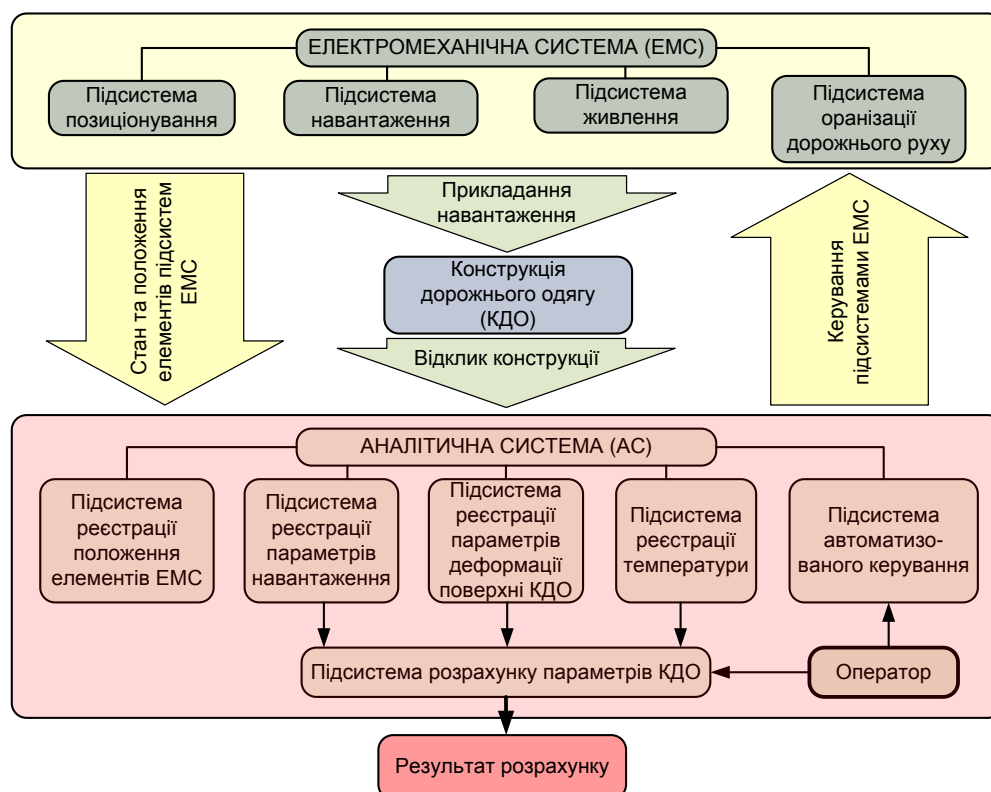
Одним з обов'язкових вузлів устаткування є підсистема навантаження, що реалізує послідовність дій по підйому, фіксації, скидання вантажу, передачі навантаження на поверхню КДО та блокування вантажу після завершення циклу навантаження. Імпульсне навантаження, як правило, утворюється за допомогою скидання вантажу на амортизуючий буфер. Величина навантаження регулюється за рахунок зміни маси вантажу, висоти скидання та жорсткості буфера. Використання амортизуючих пристроїв дозволяє підібрати час дії

навантаження та форму часової залежності імпульсу відповідно до вимог випробування. Як правило, при випробуванні прагнуть до імітації навантаження від розрахункового рухомого транспортного засобу. Фактичні значення параметрів навантаження, що передається на покриття, необхідно реєструвати безпосередньо після кожного імпульсу.

Необхідність уніфікації параметрів випробування вимагає проведення детального аналізу найбільш розповсюджених світових зразків обладнання, що дозволяють виконувати реєстрацію параметрів динамічної чаші прогину. В наслідок аналізу виділено комплекс характеристик підсистеми навантаження серед яких:

- величина тестового навантаження;
- діаметр штамбу;
- час контактної дії навантаження;
- форма часової залежності імпульсу.

Результат порівняння основних характеристик підсистеми навантаження світових зразків устаткування з вимірювання міцності дорожніх конструкцій зведено до табл. 1.



**Рисунок 2** – Функціональна схема експериментального зразка з вимірювання і оцінки міцності дорожніх одягів

**Таблиця 1** – Зведення основних параметрів підсистеми навантаження різного устаткування

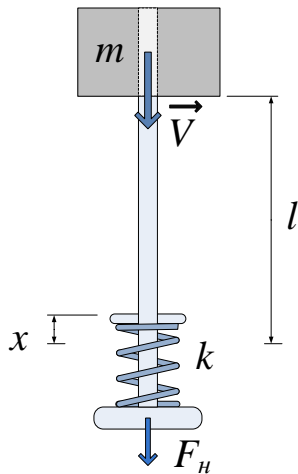
Найменування устаткування (виробник)	Діаметр штампу, см	Величина навантаження, кН	Час контактної дії, с
Дина-3М (Росдортех)	33	50	0,03
Dynatest 8002 (Dynatest)	30 (45)	7-120	0,02 – 0,03
KUAB 2M-FWD-8833 (ERES International)	30 (45)	14-150	0,02 – 0,04
Pri 2100 FWD (Grontmij, в минулому CarlBro)	30	7-150	0,02 – 0,03
Jils-20 FWD (JILS)	30,5	13,3 – 89	0,02 – 0,034

Згідно з діючими нормативними документами в Україні прийнято три групи розрахункового навантаження з величиною 57,5 кН, 50 кН та 30 кН та діаметром 30, 33 та 28 см відповідно. Аналіз світової практики вимірювання міцності за стандартом FWD показує масове використання штамсів діаметром саме 30 см для випробування нежорстких дорожніх одягів (табл. 1). Щодо величини навантаження, то більшість зразків устаткування дозволяють змінювати його в широких межах. Найбільш розповсюдженим є навантаження 50 кН, що відповідає прийнятим в Україні стандартам.

Час контактної дії та форма часової залежності навантаження має не менший вплив на параметри деформації поверхні покриття ніж величина навантаження. Так швидкість прикладання та час дії навантаження, що безпосередньо визначаються формою часової залежності тестового імпульсу, впливають на параметри напружено-деформованого стану шарів конструкції, що проявляють в'язко-пружні та пластичні властивості [1]. Крім того, зміна часу контактної дії приводить до зміни величини енергії, що витрачається на деформування конструкції, що, в свою чергу, негативно впливає на відтворюваність результатів випробування. Таким чином, для уніфікації процесу випробувань необхідно чітко встановити параметри навантаження та обов'язково виконувати їх контроль в кожному циклі. З метою імітації транспортного навантаження в сучасних зразках устаткування прийнято часову форму імпульсу у вигляді половини періоду синусоїди.

Процес вимірювання жорсткості дорожньої конструкції за допомогою експериментального зразка устаткування ХНАДУ передбачає створення

тарованої дії на покриття за рахунок передачі енергії вільно падаючого вантажу через пристрій для поглинання та накопичення енергії, що забезпечить заданий час дії та форму часової залежності навантаження. В якості такого пристрою доцільно використати пружину. Схему прикладання навантаження зображено на рис. 3.



За рисунком 3 можна виділити наступні параметри системи навантаження:

$m$  – маса вантажу, кг;

$l$  – висота падіння вантажу до моменту зупинки в нижній точці, м;

$k$  – коефіцієнт жорсткості пружини, Н/м;

$x$  – величина максимальної деформації пружини під дією енергії падіння вантажу;

$F_n$  – сила навантаження на покриття.

**Рисунок 3** – Схема прикладання навантаження на поверхню покриття

Проектування підсистеми навантаження передбачає встановлення функціональної залежності між її параметрами та характеристиками імпульсу, що генерується.

Згідно з проведеними розрахунками, величина навантаження становить:

$$F_n = \sqrt{2kmg l}, \quad (1)$$

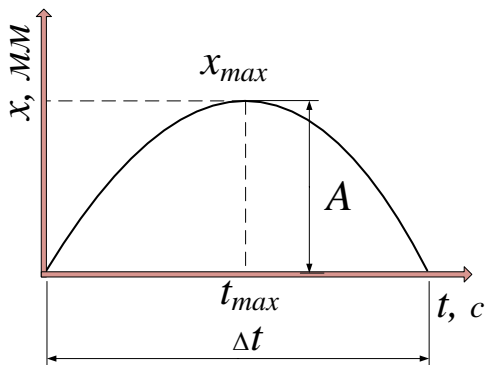
де  $g$  – прискорення вільного падіння на поверхні Землі,  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;

При нульовій початковій швидкості вантажу закономірність зміни деформації пружини в часі описується рівнянням:

$$x(t) = A \sin\left(t \sqrt{\frac{k}{m}}\right). \quad (2)$$

Сила стиску пружини пропорційна величині її деформації. Закономірність деформації пружини та, відповідно, величини навантаження на покриття за

часом, згідно з залежністю 2, за повний цикл навантаження-розвантаження покриття зображено на рис. 4:



Згідно з умовними позначеннями (рис. 4) серед параметрів циклу навантаження-розвантаження можна відмітити:

$A$  – амплітуда коливання пружини;

$\Delta t$  – повний час дії навантаження;

$x_{max}$  – максимальна деформація пружини;

$t_{max}$  – час, що відповідає максимальній деформації пружини.

**Рисунок 4** – Закономірність зміни абсолютної деформації пружини за часом

Максимальне навантаження  $F_H$  на покриття співпадає за часом з максимальною деформацією пружини. За аналізом залежності 2 слідує, що  $t_{max} = \Delta t/2$ , таким чином для моменту часу  $t_{max}$ :

$$\sin\left(t_{max} \sqrt{\frac{k}{m}}\right) = 1,$$

$$t_{max} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (3)$$

Таким чином, тривалість циклу навантаження-розвантаження:

$$\Delta t = t_{max} \cdot 2 = \sqrt{\frac{m}{k}} \cdot \pi, \quad (4)$$

Звідси визначаємо коефіцієнт жорсткості пружини:

$$k = \frac{\pi^2 m}{\Delta t^2}. \quad (5)$$

та масу вантажу:

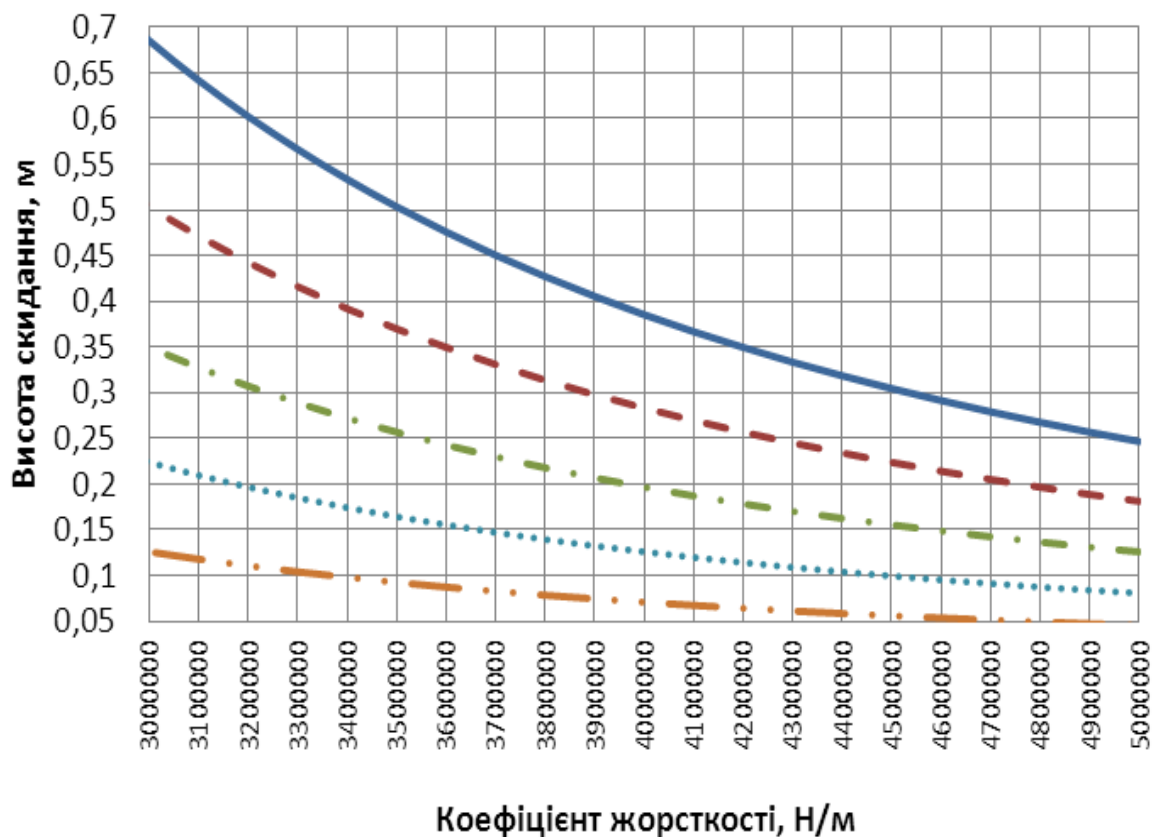


$$m = \frac{k \cdot \Delta t^2}{\pi^2}. \quad (6)$$

Згідно з залежністю 1 розрахункова висота скидання вантажу становить:

$$l = \frac{F_n^2}{2kmg}. \quad (2.15)$$

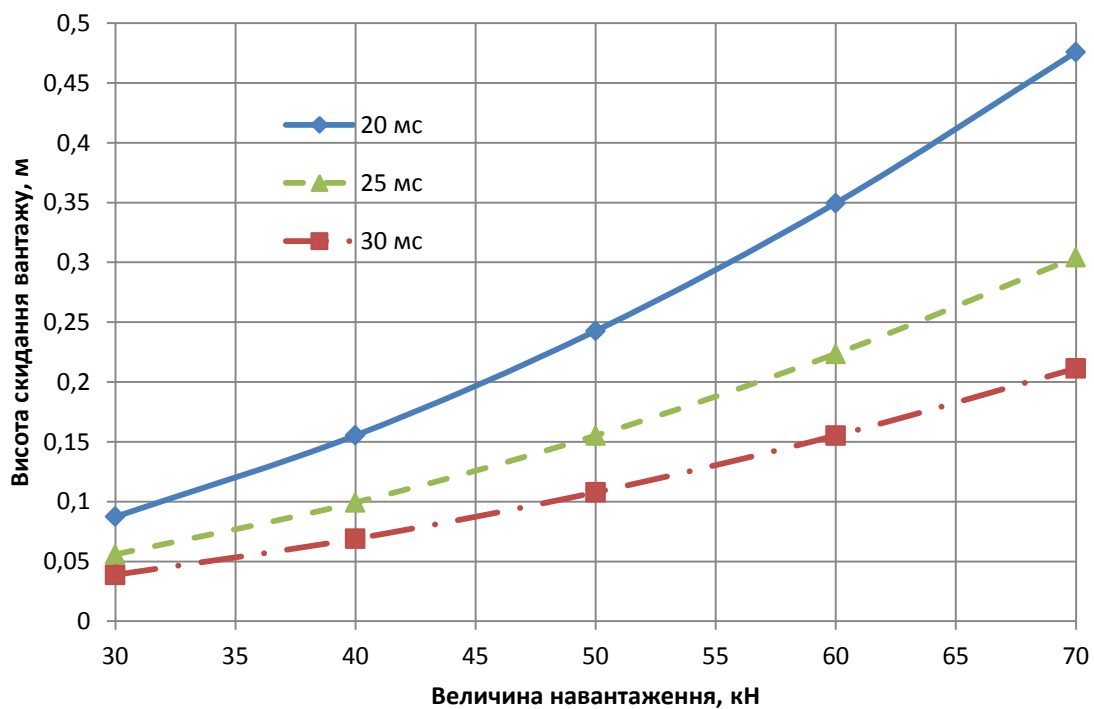
З урахуванням проектних технічних характеристик устаткування діапазон зміни тестового навантаження складає 30-70 кН. На основі встановлених залежностей виконано параметричне моделювання з метою підбору раціонального співвідношення таких параметрів як маса вантажу, висота скидання та коефіцієнт жорсткості пружини. Залежність висоти скидання, необхідної для досягнення заданої величини навантаження з часом дії 20 мс, від коефіцієнту жорсткості пружини наведено на рис. 5.



**Рисунок 5** – Залежність висоти скидання вантажу від коефіцієнту жорсткості пружини для різної величини тестового навантаження з часом дії 20 мс

При інших сталих величина навантаження залежить від висоти скидання вантажу. При цьому зменшення необхідної висоти скидання може привести до збільшення похибки при налаштуванні устаткування. В той же час збільшення необхідної висоти скидання приводить до збільшення габаритів приладу та вимог до технічних можливостей підсистеми підйому вантажу. За аналізом встановленої залежності (рис. 5) для діапазону раціональної висоти скидання вантажу (0,5 м – 0,05 м) діапазон за коефіцієнтом жорсткості пружини становить 3500000 – 4500000 Н/м.

За результатами моделювання виконано проектування та виготовлено пружину, що задовольняє поставленим вимогам. Коефіцієнт жорсткості пружини становить 3600000 Н/м. З урахуванням параметрів отриманої пружини встановлено залежність висоти скидання вантажу від необхідної величини тестового навантаження. Відповідну залежність наведено на рис. 6.



**Рисунок 6** – Залежність висоти скидання вантажу від необхідної величини тестового навантаження для різного часу дії

Згідно з технічним завданням устаткування для вимірювання міцності дорожньої конструкції буде реалізовано у вигляді причепу, на якому змонтовано ударний механізм та комплекс вимірювального обладнання.

Використання аналітико-емпіричної методології оцінки стану конструктивних елементів дорожньої конструкції, яку буде втілено в спеціалізованому програмному забезпеченні, дозволить досягти високої точності оцінки міцності окремих конструктивних елементів дорожньої конструкції на основі обмірюваних параметрів динамічної чаші прогину.

Обов'язковим етапом в розробці діагностичного обладнання є проведення робіт по метрологічній атестації з використанням стандартних засобів вимірювальної техніки. Специфіка сфери використання такого обладнання вимагає також проведення порівняльних випробувань із залученням національних та міжнародних зразків вимірювальних комплексів. Порівняльні випробування в межах міжнародного співтовариства є також необхідною умовою для інтеграції України в світову систему контролю якості автомобільних доріг.

### Література

1. Смирнов А.В. Динамика дорожных одежд автомобильных дорог. – Омск: Западно-Сибирское книжное издательство. Омское отделение, 1975. – 184 с.
2. Стелюк Л.П. Экспресс – методы определения прочности дорожных одежд / Стелюк Л.П., Анфимов В.А., Чайка А.Т. – Харьков: Харьковское областное правление НТО автомобильного транспорта и дорожного хозяйства, 1981. – 24 с.
3. Автомобільні дороги. Визначення транспортно-експлуатаційних показників дорожніх покриттів. Методи та засоби: ДСТУ 218.02070915-102-2003. – [Введено вперше 2003-12-12]. – К.: Укравтодор, 2003. – 38 с. – (Державний стандарт України).
4. Per Ullidtz. Modelling Flexible Pavement Response and Performance / Per Ullidtz. – Denmark: Polyteknisk Forlag, 1998. – 205 p.
5. Офіційний сайт міжнародного співтовариства користувачів вимірювальних комплексів FWD. Дані взято за ел. адресою: (<http://pms.nevadadot.com>)