

УДК 625.7/.8

Шуляк І.С.

### **ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИПРОБУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ КОЛІЄСТІЙКОСТІ ДОРОЖНІХ КОНСТРУКЦІЙ**

**Анотація.** В статті на основі аналізу та використання основних положень механіки контактної взаємодії тіл виконано теоретичне обґрунтування параметрів випробувального обладнання для створення навантаження на дорожню конструкцію при оцінюванні її колієстійкості.

**Ключові слова:** дорожня конструкція, параметри випробувального обладнання, колієстійкість, формули Герца, ударне навантаження.

УДК 625.7/.8

Шуляк И.С.

### **ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОЛІЄСТОЙКОСТИ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Аннотация.** В статье на основании анализа и использования основных положений механики контактного взаимодействия тел выполнено теоретическое обоснование параметров испытательного оборудования для создания нагрузки на дорожную конструкцию при оценке ее колеестойкости.

**Ключевые слова:** дорожная конструкция, параметры испытательного оборудования, колеестойкость, формулы Герца, ударная нагрузка.

UDC 625.7/.8

Shuliak I.S.

### **JUSTIFICATION OF TEST EQUIPMENT TO ASSESS CALLS ROAD CONSTRUCTIONS**

**Abstract.** The article deals with analysis and main provisions of mechanics bodies contact interaction. Theoretical justification of test equipment parameters for load creation on road construction at its wheel tracking durability evaluation is done.

**Keywords:** road construction, test equipment parameters, wheel tracking durability, Hertz's formulas, impact load.

## **Вступ**

В роботах [1 – 3] запропоновано спосіб оцінювання колієстійкості дорожніх конструкцій, оснований на аналізі розмірів і форми лунки, що утворюється при повторному навантаженні поверхні покриття сферичним штампом безпосередньо на дорозі в польових умовах. З метою зменшення тривалості та підвищення продуктивності подібних випробувань було запропоновано використовувати динамічне навантаження за допомогою ударника, обладнаного сферичним штампом.

В даній статті на основі аналізу і використання основних положень механіки контактної взаємодії тіл виконана спроба теоретичного обґрунтування параметрів випробувального обладнання для реалізації згаданого способу.

Явище удару дуже часто зустрічається в техніці, в одних випадках воно приносить шкоду, в інших користь. Зовнішнє різнобарв'я ударних явищ не може приховати їх типові риси:

1) з кінематичного боку – швидкоплинність акту удару, за малий час якого відбуваються різкі зміни швидкостей, але малі зміни координат;

2) з динамічного боку – виникнення, а потім зникнення значних ударних сил [4].

Удар можна визначити як сукупність явищ, пов'язаних з різкими змінами швидкостей точок механічної системи, які відбуваються за такий малий час, що в порівнянні з імпульсами виникаючих при цьому ударних сил, можна знехтувати імпульсами всіх інших сил.

Постановка будь-якої задачі про удар полягає в формулюванні інерційних і реологічних властивостей тіл, які утворюють досліджувану модель (виділення інерційних елементів, використання уявлень про абсолютно тверде тіло і про тіла, які мають властивість пружності, в'язкості, пластичності), а також властивостей, які приписують силам ударної природи (їх розподіленість або зосередженість в просторі і часі).

## **Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій**

Однією з моделей, яка використовується в теорії удару, є модель абсолютно твердого тіла, яка розглядалась ще Ньютоном [4].

Добре відомо, що за допомогою цієї моделі вдалося розв'язати з великим ступенем точності багато важливих задач механіки. Одночасно зазначимо, що

існує ряд інших задач, для яких названа модель виявляється хоча і можливою, але лише грубо наближеною, і не забезпечує потрібну точність результатів розв'язку. Нарешті, є задачі, які в принципі не розв'язуються за допомогою уявлення про абсолютно тверде тіло.

Очевидно, що не має строгого змісту і наступне припущення Ньютона, який сформулював більш гнучке додаткове співвідношення. Він прийняв як постулат, що відносні швидкості тіл або, матеріальних точок перед ударом прямо пропорційні відносним швидкостям після удару:

$$V_{A+} - V_{B+} = -R(V_{A-} - V_{B-}). \quad (1)$$

Наприклад, для двох куль  $R$  називають коефіцієнтом поновлення. На думку Ньютона, він відбиває «власні» фізичні властивості тіл і не залежить від швидкості співудару. Знак « $-$ » перед  $R$  вводиться для того, щоб  $R$  було більше 0. Тоді разом з рівнянням, яке описує закон збереження імпульсу, можна розрахувати швидкість після удару, використовуючи її значення до удару

$$\begin{aligned} V_{A+} &= \frac{(m_A - Rm_B)V_{A-} + m_B(1+R)V_{B-}}{m_A + m_B}, \\ V_{B+} &= \frac{m_A(1+R)V_{A-} + (m_B - Rm_A)V_{B-}}{m_A + m_B}. \end{aligned} \quad (2)$$

Значення  $R$  потрібно визначати дослідним шляхом, простіше всього – шляхом спостереження за висотою відскоку тіла  $h_+$  після його падіння з заданої висоти  $h_-$  на горизонтальну площину:  $|V_{A-}| \sqrt{2gh_-}$  – швидкість кулі після удару,  $V_{B-} = V_{B+} = 0$  (друге тіло – земля – нерухоме). Тоді можна легко отримати:

$$\begin{aligned} R &= \frac{|V_{A+}|}{|V_{A-}|} = \sqrt{\frac{h_+}{h_-}}, \\ R &= \sqrt{\frac{h_+}{h_-}}, \\ h_- &\geq h_+. \end{aligned} \quad (3)$$

Концепція Ньютона включає в себе не тільки випадки абсолютно пружного  $R = 1$  і абсолютно не пружного удару  $R = 0$ , а також і проміжні випадки не пружного удару  $0 < R < 1$ . В цих виразах проглядається натяк на існування деформацій пружних або пластичних.

Але, в цілому, найсуттєвішим недоліком згаданої моделі є те, що вона не дає змогу розрахувати деформації тіл при ударі.

В кінці XIX століття Г. Герцом була вирішена задача про контакт сферичного тіла з напівпростором (рис. 1) [5 – 6].

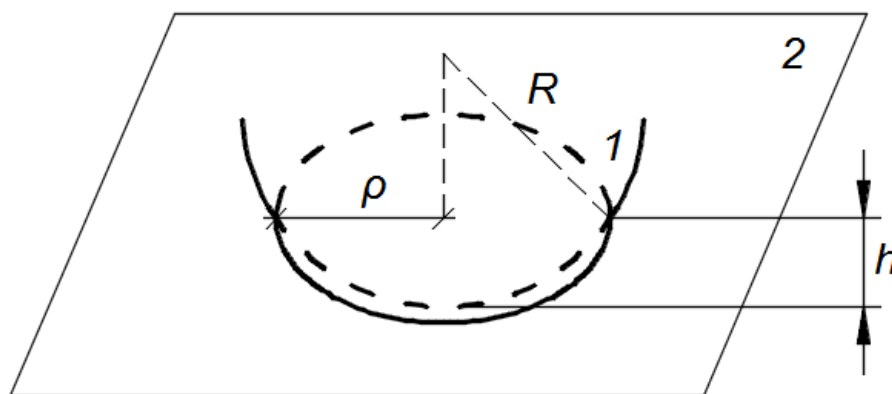


Рисунок 1 – Контакт сферичного індентора з пружним напівпростором

У відповідності з теорією Герца зближення тіл  $\alpha_0$  є степеневою функцією контактної навантаження  $P$  [7], тобто:

$$P = k\alpha_0^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

де  $k$  – стала, яка залежить від матеріалів контактуючих тіл і початкової кривизни їх поверхонь в точці контакту.

Нелінійність цієї залежності пояснюється тим, що в процесі стискування площа контактної області не залишається сталою (в подібних випадках говорять про конструктивну нелінійність системи). Пропонувались розв'язки цієї задачі, які ґрунтуються на припущенні більш щільного стискання тіл в контактній зоні. При цьому зв'язок  $P = P(\alpha)$  виявився більш близьким до лінійного ніж зазначеного вище.

Теорію Герца неважко модифікувати, приймаючи інші залежності між  $P$  та  $\alpha$ . Так в роботі [8] отримано розв'язок задачі для довільного степеня  $n$ :

$$P = k\alpha^n. \quad (5)$$

Вирішення задачі Герца лягло в основу механіки контактної взаємодії твердих тіл [9].

В літературі відомі рішення багатьох контактних задач. В роботах [10 – 12] розглядалась взаємодія частинок з перепоною, при якій визначалась глибина лунки, що залишалась на поверхні металевої мішені після удару сферичного ударника, в ролі якого виступали тверді частинки.

В роботі [13] розглядалась динамічна модель вдавлювання жорсткої гладкої сфери в однорідне пружно-пластичне тверде тіло. На основі даної моделі авторами були запропоновані чисельно-аналітичні залежності, що описують поведінку твердого тіла в пружно-пластичній області контактної взаємодії. Дані залежності дозволяють врахувати додаткове зближення контактуючих тіл за рахунок динамічного навантаження.

В роботі [14] авторами вирішувалась задача про вдавлювання інерційної недеформованої сфери під кутом до металевого напівпростору. Результати зводились до визначення коефіцієнтів відновлення швидкості.

В роботах [10, 15, 16] в якості характеристики матеріалу напівпростору використовувалась динамічна твердість  $H_1$  та щільність  $\rho_1$ . З другою характеристикою проблем немає, в той же час для асфальтобетонних шарів відсутня будь-яка інформація про їх динамічну твердість. Введення нового показника пов'язане зі значною трудомісткістю експериментальних досліджень. Тому будемо використовувати відому характеристику – модуль пружності, про залежність якого від температури є достатньо інформації і в існуючій літературі [17]. Ця ж характеристика входить до формул Герца [5], які ми використаємо як перше наближення до теоретичного обґрунтування параметрів випробувального обладнання для створення ударного навантаження.

### **Основна частина**

Згідно з теорією Герца радіус кругової площадки контакту визначається за формулою [5]:

$$\rho = 0,909\sqrt[3]{\theta_{\Sigma}RN}, \quad (6)$$

$$\theta_{\Sigma} = \theta_1 + \theta_2 = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}, \quad (7)$$

де  $E_1, \mu_1; E_2, \mu_2$  – пружні механічні властивості матеріалів контактуючих тіл – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона відповідно;

$R$  – радіус індентора, м;

$N$  – навантаження на індентор, Н.

Вираз для максимального тиску в зоні контакту має вигляд [5]:

$$p_{\max} = 0,578 \cdot \sqrt[3]{\frac{N}{\theta_{\Sigma}^2 R^2}}. \quad (8)$$

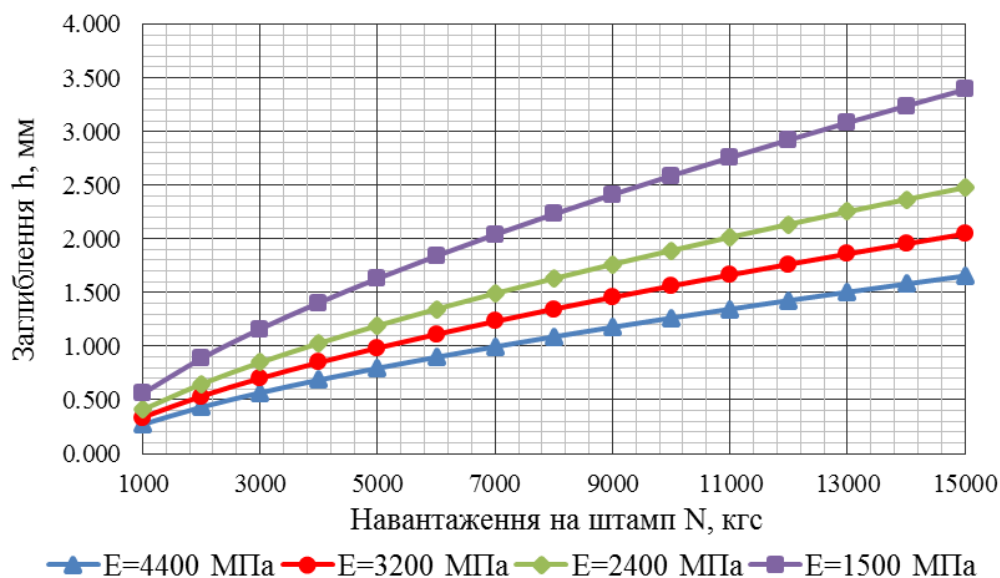
Заглиблення  $h$  індентора в пружній напівпростір визначається за формулою [2]:

$$h = 0,825 \cdot \sqrt[3]{\frac{\theta_{\Sigma}^2 \cdot N^2}{R}}. \quad (9)$$

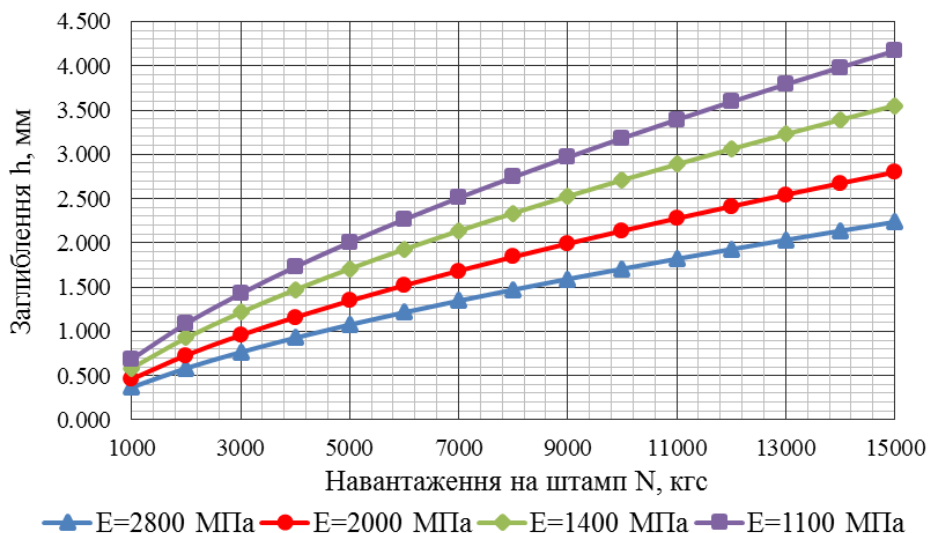
Модуль пружності індентора  $E_1 \rightarrow \infty$ , тому вираз (7) матиме вигляд:

$$\theta_{\Sigma} = \theta_2. \quad (10)$$

Скориставшись формулою (9) та виконавши необхідні розрахунки, отримали графіки залежностей заглиблення індентора від навантаження на штамп для щільних (рис. 2) та пористих і високопористих (рис. 3) асфальтобетонів на бітумах різних марок.



**Рисунок 2** – Графік залежності заглиблення індентора від навантаження на штамп (для щільного асфальтобетону)



**Рисунок 3** – Графік залежності заглиблення індентора від навантаження на штамп (для пористого і високопористого асфальтобетону)

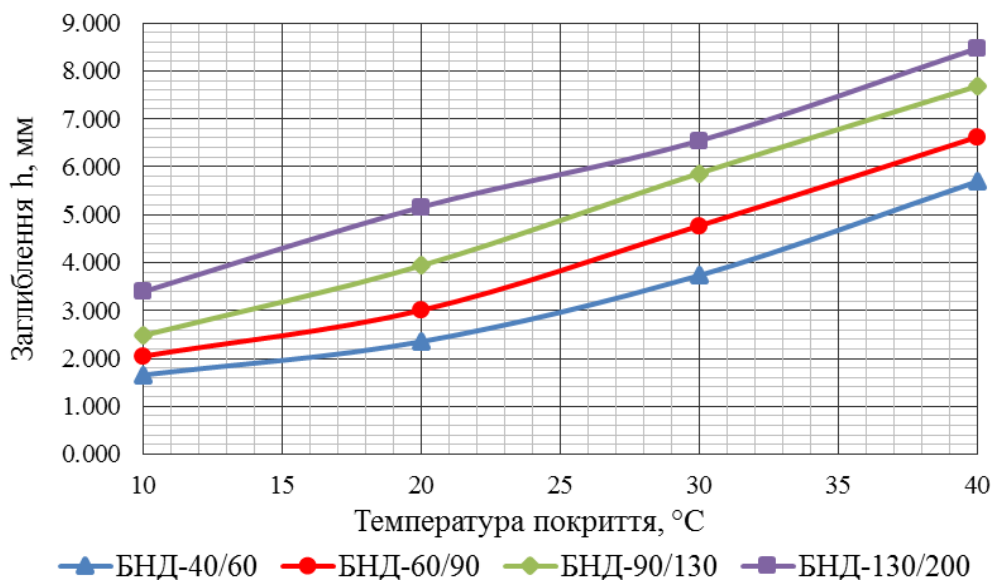
При цьому, для розрахунків були використані максимальні розрахункові значення короточасних модулів пружності, взяті з табл. Е.2 Додатку Е [17], оскільки необхідно, щоб заглиблення індентора відбувалось навіть при малих температурах покриття. Навантаження на штамп змінювали в діапазоні від 1000 до 15000 кгс.

Отримані графіки свідчать про те, що зі збільшенням навантаження на штамп величина заглиблення індентора також збільшується. При цьому, щоб виміряти дану величину з необхідною точністю, вона повинна знаходитись в межах декількох міліметрів.

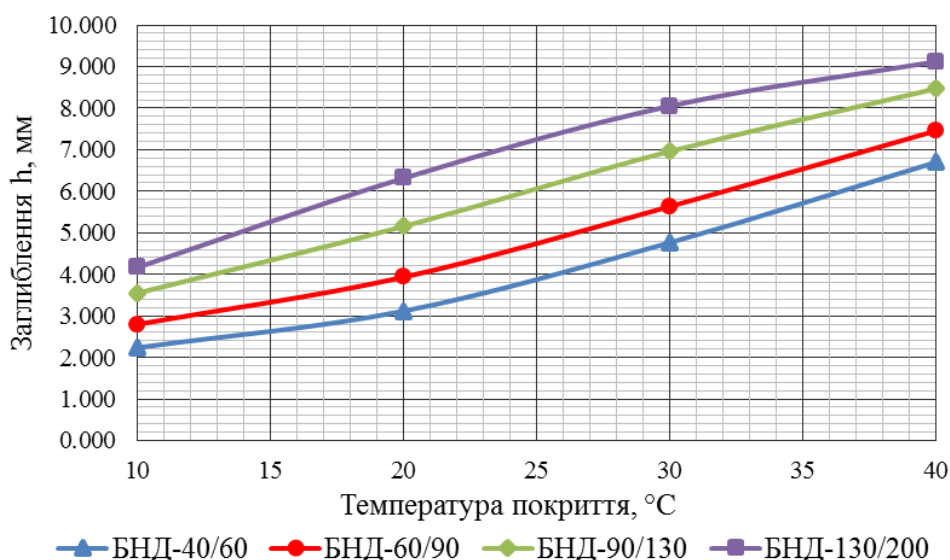
Звідси випливає, що при проведенні випробувань дорожніх конструкцій на колієстійкість величина тестового навантаження, прикладеного на штамп, повинна становити від 8000 до 15000 кгс.

Підставивши максимальне значення тестового навантаження на штамп в формулу (9), аналогічно отримаємо графіки залежностей заглиблення індентора від температури покриття для щільних (рис. 4) та пористих і високопористих (рис. 5) асфальтобетонів.

З отриманих графіків слідує, що величина заглиблення індентора залежить не тільки від навантаження на штамп, а й від температури поверхні покриття.



**Рисунок 4** – Графік залежності заглиблення індентора від температури покриття (для щільного асфальтобетону)



**Рисунок 5** – Графік залежності заглиблення індентора від температури покриття (для пористого і високопористого асфальтобетону)

Тому, при виборі вимірювального обладнання для реєстрації величини заглиблення індентора необхідно звернути увагу на те, що діапазон вимірювань даного обладнання повинен знаходитись в межах від 1,0 до 15,0 мм.

Важливим параметром випробувального обладнання, що також потребує обґрунтування, є радіус індентора.

Скориставшись формулою (9) та змінюючи значення радіуса індентора в діапазоні від 10 до 150 мм, отримаємо графіки залежностей заглиблення



індентора від радіуса для щільних (рис. 6) та пористих і високопористих (рис. 7) асфальтобетонів.

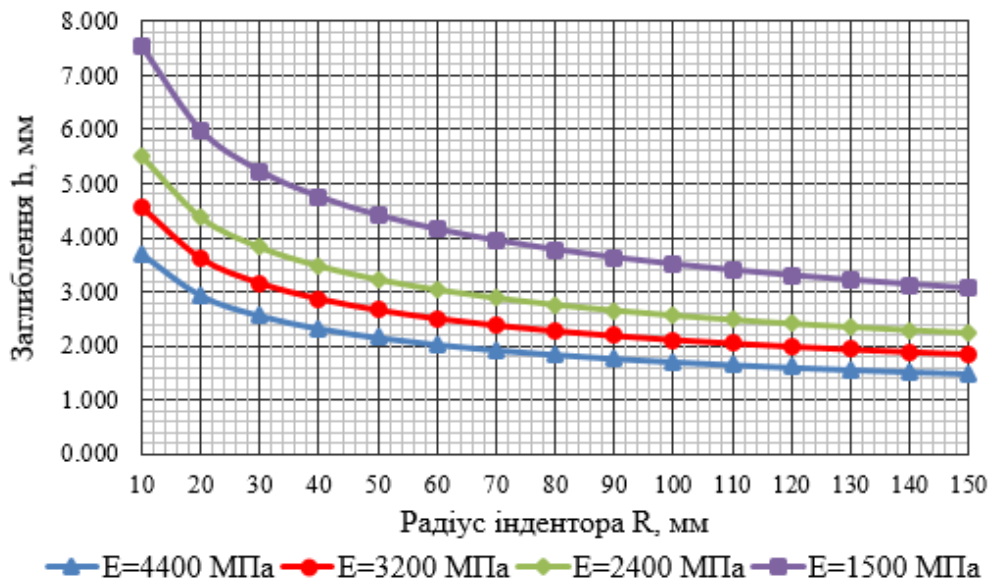


Рисунок 6 – Графік залежності заглиблення індентора від радіуса (для щільного асфальтобетону)

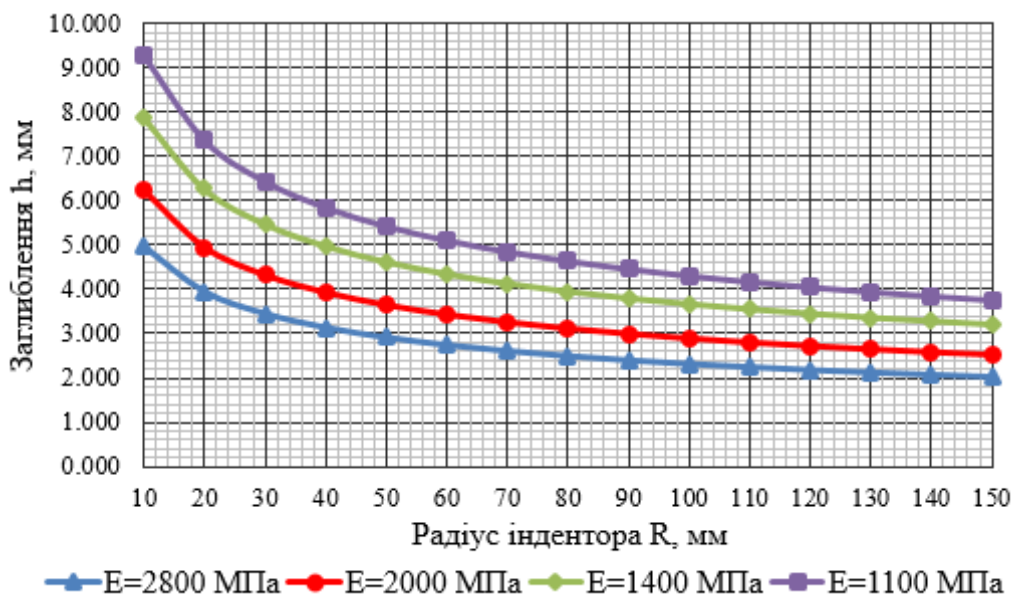


Рисунок 7 – Графік залежності заглиблення індентора від радіуса (для пористого і високопористого асфальтобетону)

З отриманих графіків слідує, що у випадку, коли радіус індентора знаходиться в межах від 10 до 70 мм, величина заглиблення може досить сильно змінюватись.

В той же час, як показали експериментальні дослідження, при використанні інденторів малих радіусів результати випробувань можуть виявитись хибними (рис. 8).



**Рисунок 8** – Лунки, що утворились на покритті, після серії ударних навантажень індентором  $R = 42$  мм

Це пояснюється тим, що в місці контакту індентора з асфальтобетонним покриттям замість накопичення залишкових пластичних деформацій відбувається руйнування окремих щебінок.

Тому при оцінюванні колієстійкості дорожніх конструкцій доцільно використовувати індентори радіусом від 70 до 150 мм.

### **Висновки**

1. На основі аналізу основних положень механіки контактної взаємодії тіл, встановлено доцільність застосування формул Герца в якості першого наближення до теоретичного обґрунтування параметрів випробувального обладнання для створення навантаження при оцінюванні колієстійкості дорожніх конструкцій.

2. Теоретично обґрунтовано, що при проведенні випробувань дорожніх конструкцій на колієстійкість величина тестового навантаження повинна складати від 8 до 15 тс, при радіусі сферичного індентора від 70 до 150 мм. При цьому обладнання для реєстрації величини заглиблення індентора повинно мати діапазон вимірювань від 1,0 до 15,0 мм.

3. Результати експериментальних досліджень колієстійкості дорожніх конструкцій з використанням обладнання із схожими параметрами [1 – 3] підтвердили доцільність застосування його на практиці.

### Література

1. Шуляк І. С. Контроль стійкості дорожніх одягів до колієутворення / І. С. Шуляк // Тези XII Міжнар. конф. «Контроль і управління в складних системах» (14–17.10.2014). – Вінниця : ВНТУ, 2014. – С. 73.
2. Шуляк І.С. Спосіб оцінювання колієстійкості дорожніх конструкцій / Д.О. Павлюк, І.С. Шуляк // Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : ПНТУ, 2016. – Вип. 2 (47). – С. 246 – 257.
3. Шуляк І.С. Удосконалення способу оцінки колієстійкості нежорстких дорожніх одягів / І.С. Шуляк // Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні геоінформаційні та комп'ютерно-інноваційні технології дорожньої галузі, аеродромного будівництва та землеустрою» (26–27.05.2016). – Харків : ХНАДУ, 2016. – С. 61 – 64.
4. Пановко Я. Г. Введение в теорию механического удара / Я.Г. Пановко. – М. : Наука, 1977. – 224 с.
5. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн. Кн. 1. Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисына. – М. : Машиностроение, 1979. – 358 с.
6. Зегжда С.А. Соударение упругих тел / С.А. Зегжда. – СПб. : СПбГУ, 1997. – 316 с.
7. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М. : Наука, 1975. – 567 с.
8. Кильчевский Н.А. Теория соударения твёрдых тел / Н.А. Кильчевский. – К. : Наукова думка, 1969. – 245 с.
9. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М. : Мир, 1989. – 510 с.
10. Лашков В.А. Изменение шероховатости поверхности под воздействием облака твердых частиц / В.А. Лашков, С.К. Матвеев // Вестник Санкт-Петербургского университета. – СПб. : СПбГУ, 2009. – Сер. 1, Вып. 1. – С. 76 – 82.
11. Finnie I. On the formation of surface ripples during erosion / I. Finnie, Y.H. Kabil // Wear. – France : Elsevier Science Publishing Company, 1965. – Vol. 8, Issue 1. – P. 60 – 69.
12. Гетерогенные технологии: проблемы взаимодействия частиц с преградой / А.П. Алхимов, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, Д.С. Михатулин, Ю.В. Полежаев // Теплофизика и аэромеханика. – Новосибирск : Изд-во Сибирского отделения РАН, 2005. – Т. 12, № 3. – С. 415 – 431.
13. Максименко А.А. Динамическая модель упругопластического контактного взаимодействия гладких тел / А.А. Максименко, Н.В. Котенева // Известия Томского политехнического университета. – Томск. : ТПУ, 2007. – Т. 310, № 2. – С. 64 – 66.
14. Лашков В.А. Коэффициент восстановления скорости при ударе под углом / В.А. Лашков // Вестник Санкт-Петербургского университета. – СПб. : СПбГУ, 2010. – Сер. 1, Вып. 2. – С. 31 – 38.
15. Витман Ф.Ф. Влияние скорости деформирования на сопротивление деформированию металлов при скоростях удара  $10^2 - 10^3$  м/с / Ф.Ф. Витман, В.А. Степанов // Некоторые проблемы прочности твердого тела. – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1959. – С. 207 – 221.
16. Витман Ф.Ф. О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании / Ф.Ф. Витман, Н.А. Златин // Журнал технической физики. – М. : Наука, 1963. – Т. 33, № 8. – С. 982 – 989.
17. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу: ВБН В.2.3–218–186–2004. - [Чинний від 2005-01-01]. – К. : Укравтодор, 2004. – 176 с.

#### Рецензенти:

Кизима С.С., канд. техн. наук, Національний транспортний університет.

Кіяшко І.В., канд. техн. наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

#### Reviewers:

Kuzyma S.S., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.), National Transport University.

Kiiashko I.V., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.), Kharkiv National Automobile and Highway University.

Стаття надійшла до редакції: **20.01.2017 р.**