

**І.П. Гамеляк, Я.М. Якименко, І.В. Коц,\***  
Національний транспортний університет,  
кафедра ДБМ і хімії,

01010, м. Київ, вул. Суворова, 1,

\*Вінницький національний технічний університет,  
Науково-дослідна лабораторія гідродинаміки,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

## **МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З НЕРІВНОСТЯМИ ПОВЕРХНІ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ**

© Гамеляк І.П., Якименко Я.М., Коц І.В., 2007

Наведено результати моделювання зміни коефіцієнта динамічності з врахуванням параметрів підвіски транспортних засобів, швидкості їх руху та ступеня нерівності покриття. Наведено результати розрахунків коефіцієнта динамічності для різних станів покриття та їх порівняння з відомими експериментальними даними. Розроблена модель дає змогу уточнити значення коефіцієнта динамічності для розрахунку конструкцій дорожніх одягів на міцність та витривалість.

**In this article the results of design of change the coefficient of dynamic are presented taking into account the parameters of springs and dampers of vehicles, speed of their movement and degree of roughness of road pavement. The results of calculations are resulted to the coefficient of dynamic for the different states of pavement and their comparing to the known experimental data. The developed model allows to specify a value the coefficient of dynamic for the calculation of constructions of road pavement on durability and fatigue.**

**Постановка проблеми.** Забезпечення нормального експлуатаційного стану автомобільних доріг є одним з найважливіших завдань дорожньої служби. Швидкість, безпека та комфорт руху, економічні показники роботи транспорту насамперед залежать від стану покриття. Характер і ступінь впливу покриття на умови руху автомобілів визначаються насамперед рівністю та зчіпними якостями. В процесі експлуатації внаслідок дії автомобільного транспорту та атмосферних чинників поверхня дорожнього покриття спотворюється як у поздовжньому, так і у поперечному профілях, тобто погіршується рівність покриття. Разом з рівністю змінюються і зчіпні властивості покриттів та навантаження від колеса на поверхню покриття. Внаслідок нерівномірного розподілу транспортних засобів по ширині проїзної частини її експлуатаційні якості також змінюються нерівномірно [1, 3, 5, 6, 8]. В зв'язку з цим вивчення закономірностей взаємодії транспортних засобів з нерівностями поверхні дорожніх покриттів є актуальною важливою науково-практичною задачею, розв'язання окремих положень якої виконується у цій роботі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Потрібно зробити висновок, що переважна більшість вчених, які займаються конструкціями автомобілів, надійністю експлуатації, паливною економічністю автомобілів, у більшості випадків не розглядають вплив фактора нерівної дороги і параметрів підресорювання на досліджувані параметри [1, 3–6].

Розраховуючи різноманітні параметри і характеристики автомобілів під час руху по нерівній дорозі, необхідно в комплексі розглядати теорію плавності ходу і динаміку кочення колеса по нерівній опорній поверхні, фізико-механічні характеристики матеріалу покриття доріг, паливну економічність та інші складові процесу руху [3, 4, 6, 8, 11].

**Мета та основні задачі досліджень.** Мета роботи – аналіз відомих способів експериментальних досліджень коливальних процесів в процесі руху автомобілів і теоретичні основи визначення динамічних зусиль від шин рухомих транспортних засобів.

З врахуванням стану питання і відповідно до мети виконуваної роботи було сформульовано такі задачі досліджень:

1. Розроблення математичної моделі коливальної системи “автомобіль–дорога” для сталого руху автомобіля по нерівній опорній поверхні з врахуванням величин рухомих мас, жорсткостей ресорних підвісок, пружності шин, пружних характеристик покриття автомобільної дороги, а також обов’язкового врахування висоти нерівностей і швидкості руху автомобіля.

2. Розроблення програмного забезпечення для проведення чисельного експерименту із визначення коефіцієнта динамічності при проїзді різних типів транспортних засобів по покриттях з нерівностями за запропонованими математичними моделями і проведення теоретичних досліджень впливу нерівностей дороги на пружні і демпфуючі властивості дороги, підвіски і шин на коефіцієнт динамічності.

3. Оцінка адекватності розробленої теоретичної моделі на підставі аналізу результатів експериментальних і теоретичних досліджень.

**Теоретичні дослідження.** При розрахунку конструкції дорожнього одягу (КДО) велике значення має правильне врахування динамічних навантажень на дорогу, що проводиться за допомогою коефіцієнта динамічності навантаження, від величини якого залежать значення напружень і деформацій в дорожній конструкції, які отримують при проектуванні КДО, а отже, визначається і відповідна товщина дорожнього одягу.

Результати аналізу відомих даних про величину динамічних навантажень на покриття, отримані в результаті досліджень, проведених в ряді науково-дослідних організацій [4, 6, 8], свідчать про певні протиріччя та розходження. Саме це і спонукало зробити нову серію досліджень. Роботу було розпочато з теоретичного аналізу взаємодії шин автомобіля і дорожнього одягу, в якому було поставлене завдання врахувати коливання не тільки автомобіля, але і дорожнього одягу. Розрахункова схема автомобіля і дорожнього одягу, наведена на рис. 1, описується наступною системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_0 \cdot \frac{dy_0^2}{dt^2} + \eta_1 \cdot \left( \frac{dy_0}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right) + c_0 \cdot y_0 + c_1 \cdot (y_0 - y_1) + F_{\text{сyx}}' \cdot \text{sign} \left( \frac{dy_0}{dt} \right) + \eta_0 \cdot y_0 = -\frac{dq}{dt} \cdot \eta_1 - q \cdot c_1; \\ m_1 \cdot \frac{dy_1^2}{dt^2} + \eta_1 \cdot \left( \frac{dy_1}{dt} - \frac{dy_2}{dt} \right) + \eta_1 \cdot \left( \frac{dy_1}{dt} - \frac{dy_0}{dt} \right) + c_2 \cdot (y_1 - y_2) + c_1 \cdot (y_1 - y_0) = \\ = F_{\text{сyx}} \cdot \text{sign} \left( \frac{dy_1}{dt} - \frac{dy_2}{dt} \right) + \eta_1 \cdot \frac{dq}{dt} + c_1 \cdot q; \\ m_2 \cdot \frac{dy_2^2}{dt^2} + \eta_2 \cdot \left( \frac{dy_2}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right) + c_2 \cdot (y_2 - y_1) = -F_{\text{сyx}} \cdot \text{sign} \left( \frac{dy_2}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right); \\ q = q_0 \cdot (1 - \cos(v \cdot t)); \\ \frac{dq}{dt} = q_0 \cdot v \cdot \sin(v \cdot t); \\ v = \frac{2 \cdot \pi \cdot V}{S}, \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $y_2, y_1, y_0$  – переміщення підресорених і непідресорених мас автомобіля, а також дороги;  $q_0$  – висота нерівності на дорозі;  $V$  – швидкість руху автомобіля;  $S$  – довжина нерівності на дорозі.

Систему вихідних рівнянь створювали методами числового інтегрування на ПЕОМ.

Розрахунок динамічної дії автомобіля на дорожній одяг виконували за формулою:

$$P_d = c_1 \cdot \left[ (1 - \cos(v \cdot t)) \cdot q_0 - y_0 - y_1 \right] + \eta_1 \cdot \left( q_0 \cdot v \cdot \sin(v \cdot t) - \frac{dy_0}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right). \quad (2)$$

Динамічні показники процесу в розглядуваній системі оцінювали, використовуючи коефіцієнт динамічності, що розраховується за формулою:

$$K_d = \frac{P_d + P_{cm}}{P_{cm}}, \quad (3)$$

де  $P_{cm}$  – статичний тиск колеса на дорогу;  $m_0$  – коливальна маса дорожнього одягу;  $m_1$  і  $m_2$  – маса заднього моста і маса навантаженого автомобіля, приведена до заднього моста;  $\eta_0$ ;  $\eta_1$ ;  $\eta_2$  – коефіцієнти в'язкого демпферування, що відображають властивості дорожнього одягу, шини і амортизатора автомобіля;  $f_0$ ,  $f_2$  – узагальнені коефіцієнти сухого тертя в конструкції дорожнього одягу і в ресорах автомобіля;  $y_0$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  – незалежні координати переміщення мас;  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  – жорсткість пружних елементів дороги і автомобіля.

Для організації обчислювальних процедур було складено програму алгоритмічною мовою програмування Delphi 6. У результаті проведення обчислень отримано значення коефіцієнта динамічності і часу, у момент якого динамічне навантаження досягло максимуму, для швидкостей руху автомобіля від 10 до 80 км/год.

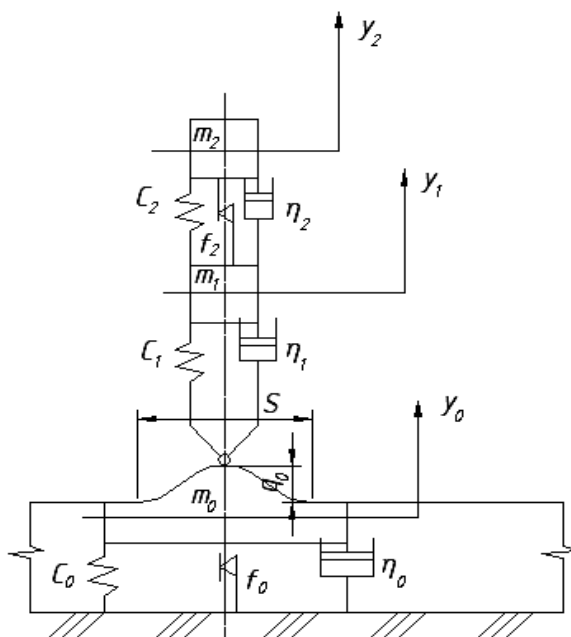


Рис. 1. Розрахункова схема автомобіля і дорожнього одягу

Система диференціальних рівнянь (1), які описують силову взаємодію автомобіля та дорожнього покриття і являють собою системи нелінійних диференціальних рівнянь, що не розв'язуються відносно вищих похідних.

Нелінійність цих рівнянь полягає в тому, що шукані функції  $y_0$ ,  $y_1$ ,  $y_2$  та їх похідні у наведеній системі диференціальних рівнянь мають цілий ряд нелінійних складових, які описують, наприклад, сили в'язкого та сухого тертя тощо. Це, наприклад, наявність у вищезгаданих рівняннях логічних функцій, зокрема функцій знака у силі сухого тертя, що ускладнює аналітичне їх розв'язання, а також значні нелінійності, функції яких мають розрив неперервності, наприклад, залежності коефіцієнтів тертя від швидкості рухомих елементів коливальної системи досліджуваних об'єктів. Ці нелінійні залежності неможливо лінеаризувати відомими класичними математичними методами. Нерозв'язність розглядуваних диференціальних рівнянь відносно старших похідних та значні нелінійності дають змогу зробити висновок щодо необхідності застосування числових методів розв'язання цієї системи диференціальних рівнянь. У результаті детального аналізу різних числових методів розв'язання подібних диференціальних рівнянь було зроблено висновок про доцільність застосування методу Рунге–Кутти–Фельберга [9] для розв'язання системи диференціальних рівнянь (1) за допомогою ПЕОМ. Моделювання виконувалось з використанням програмного забезпечення Delphi6 в операційному середовищі Windows 98 чи XP.

За відповідним алгоритмом було складено програму "Матмодель", яка дає змогу вводити значення параметрів силової взаємодії автомобіля та дорожнього покриття й отримувати відповідні результати у вигляді графіків та таблиць.

На рис. 2 наведено загальний вигляд діалогового вікна програми імітаційного моделювання "Матмодель" для дослідження силової взаємодії автомобіля та дорожнього покриття, головне меню та панель інструментів якої зображено на рис. 2, а. Програма працює так: при виборі в меню **Матмодель** команди **Вихідні дані** (рис. 2,б) програма переходить в режим введення вихідних даних (рис. 2,в), яка містить блоки введення вихідних даних і початкових умов. Після редагування вихідних даних натиснення кнопки **Зберегти** призводить до збереження введених даних, а натиснення кнопки **Вихід** – до відміни виконаних редагувань. При виборі в меню **Матмодель** команди **Розрахунок** з'являється спадне підменю (рис. 2,б), і після вибору команди **Дорожній одяг** програма переходить в режим розв'язання числовим методом Рунге–Кутти–Фельберга системи диференціальних рівнянь, в результаті чого будуються графіки, збережені у форматі **Bitmap** та таблиці значень, збережені в текстовому форматі. У процесі дослідження як параметри математичної моделі використовувались вихідні дані, які відповідають реальним параметрам автомобілів. Розрахунки проводились з кроком інтегрування  $h=10^{-4}$  с і відносною похибкою  $\varepsilon=10^{-8}$ . Стійкість розв'язку систем диференціальних рівнянь забезпечувалась перевіркою на ідентичність результатів, отриманих при значеннях кроків інтегрування  $h$  та  $h/2$ .

Результати теоретичних досліджень перевіряли зіставленням із результатами відомих експериментальних даних після оброблення їх методами планування багатофакторного експерименту при визначенні цільової функції – коефіцієнта динамічності силового навантаження дорожнього одягу від дії шин рухомого автомобіля.

Значення величини коефіцієнта динамічності навантаження дорожнього одягу є функцією двох параметрів:

$$K_D = f(q, V), \quad (4)$$

де  $q$  – висота нерівності на дорозі, мм;  $V$  – швидкість руху автомобіля, км/год.

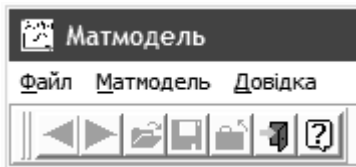
Дослідження впливу перерахованих вище факторів на коефіцієнт динамічності навантаження дорожнього одягу при проведенні однофакторних експериментів пов'язані із значними труднощами і обсягами робіт. Тому, на наш погляд, доцільно провести багатофакторний експеримент для отримання рівнянь регресії щодо функції відгуку коефіцієнта динамічності  $K_d$  за допомогою планування багатофакторного експерименту виду  $2^2$  методом Бокса–Уїлсона [10].

Діапазони варіювання факторів функцій (4) вибирали так, щоб будь-яка їх сукупність у передбачених планом експерименту діапазонах могла б бути реалізована і не приводила до протиріч. Для цього було проведено пошукові експерименти для визначення області, в якій необхідні нам сполучення рівнів факторів були б стійко реалізовані.

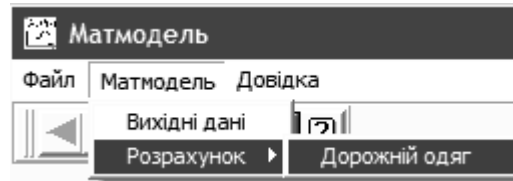
Істинні значення факторів встановлені на основі проведення пошукових експериментів і наведені в таблиці.

#### Рівні факторів та інтервали варіювання

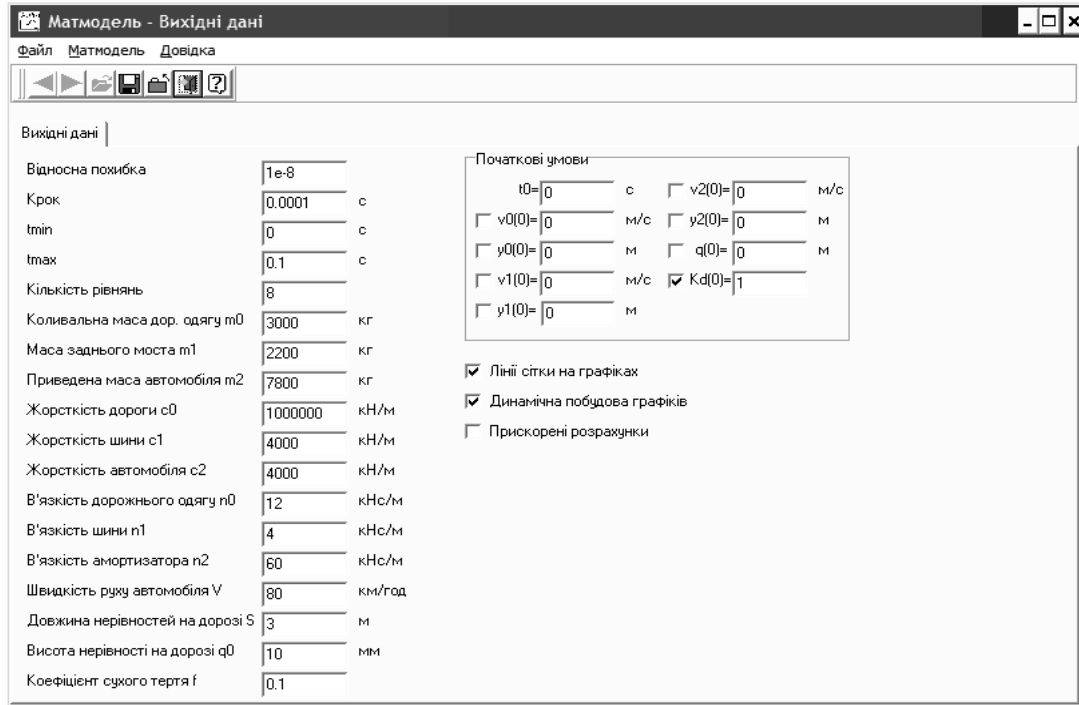
Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	-1,414	-1	0	+1	+1,414	
$x_1$ – висота нерівності на дорозі, мм	1,9956	3,9	8,5	13,1	15,0044	4,6
$x_2$ – швидкість руху автомобіля, км/год	11,72	20	40	60	68,28	20



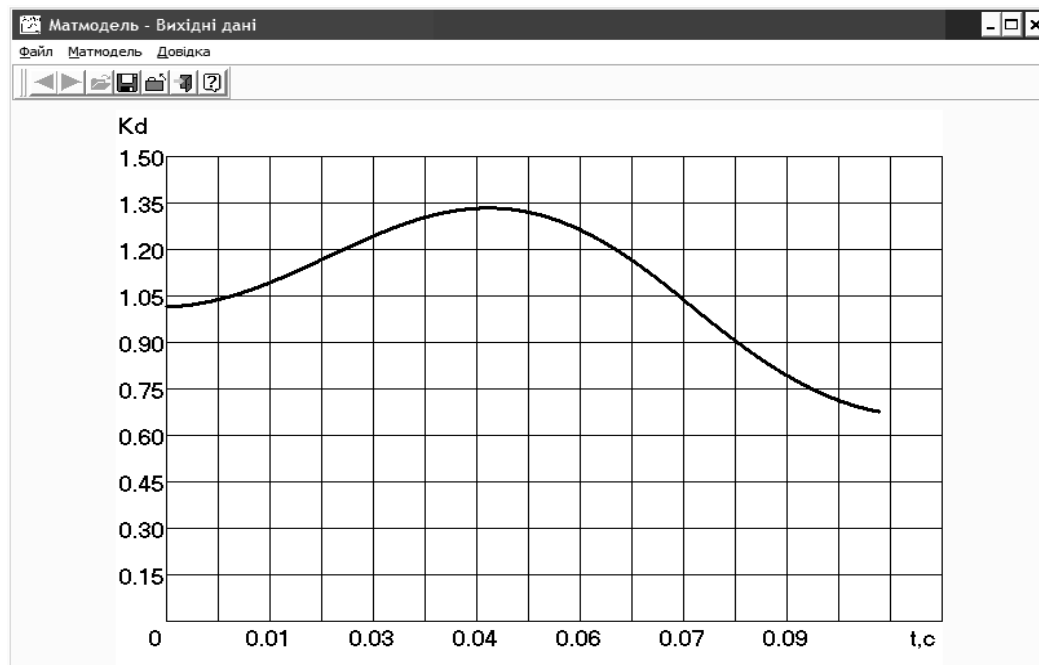
a



б



в



г

Рис. 2. Загальний вигляд вікна програми імітаційного моделювання “Матмодель”:  
 а – головне меню та панель інструментів; б – пункти меню;  
 в – введення вихідних даних; г – результати роботи програми

Після відповідного опрацювання процедур планування експерименту для дійсних значень факторів було отримане таке рівняння регресії для функції відгуку  $K_d$ :

$$K_d = 1 + 0,01128 \cdot q - 8,08 \cdot 10^{-5} \cdot V + 0,000245 \cdot q \cdot V - 0,00025 \cdot q^2 - 6,83 \cdot 10^{-6} \cdot V^2 \quad (5)$$

При цьому дисперсія відтворюваності  $S_{\text{відм}}^2 = 0,00025$ , дисперсія адекватності  $S_{\text{ад}}^2 = 0,00074$ , критерій Фішера  $F=2,96 < [F]=3,41$ . Отже, отримана регресійна модель адекватна. Квадрат коефіцієнта кореляції становив  $R^2=0,96$ .

Після відкидання незначимих квадратичних членів за критерієм Стьюдента для дійсних значень факторів рівняння регресії для функції відгуку  $K_d$  має вигляд:

$$K_d = 1 + 0,01128 \cdot q - 8,08 \cdot 10^{-5} \cdot V + 0,000245 \cdot q \cdot V \quad (6)$$

Отже, регресійна залежність коефіцієнта динамічності автомобіля від висоти нерівності на дорозі та швидкості руху автомобіля являє собою неповну квадратичну модель. Графічно цю залежність зображено поверхнею (рис. 3).

Попередній аналіз результатів розрахунку показав, що значення  $K_d$  при висоті нерівності до 15 мм на базі 3 м зростали із збільшенням швидкості автомобіля і досягали величини 1,25 – 1,35 для автомобіля МАЗ-500А, який рухався зі швидкістю 80 км/год. Встановлено, що момент виникнення максимального навантаження  $K_d$  може бути за межами циклу переїзду автомобіля через нерівність. Таке запізнювання максимуму навантаження залежить від в'язких властивостей підвіски автомобіля і швидкості його руху.

Зіставлення теоретичних результатів і отриманих на підставі математичного планування експериментів мають досить прийнятну збіжність, що дає змогу рекомендувати запропоновану методику визначення коефіцієнта динамічності навантаження дорожнього одягу і надавати відповідні рекомендації щодо співвідношень між встановленою дійсною нерівністю поверхні дорожнього покриття та обмеженнями на швидкість транспортних засобів.

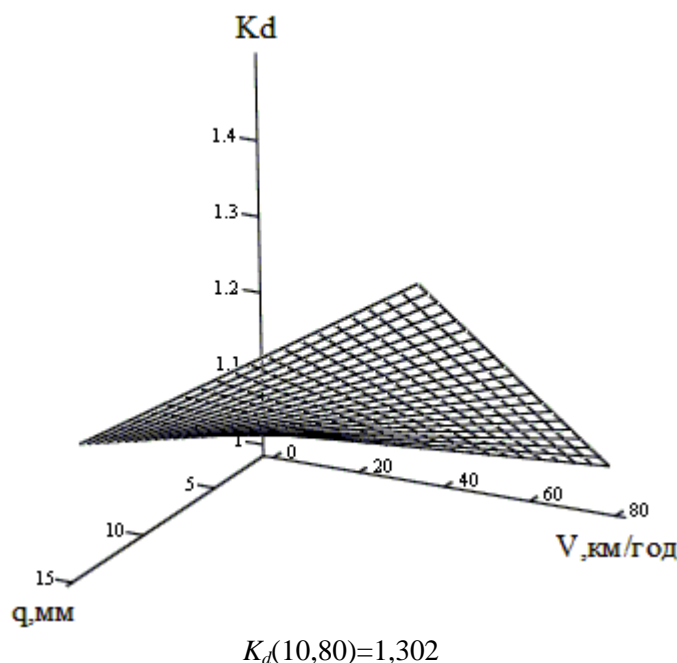


Рис. 3. Поверхня відгуку коефіцієнта динамічності навантаження дорожнього одягу  $K_d$  від дії рухомого автомобіля в площині дійсних значень параметрів: висоти нерівності на дорозі  $q$  та швидкості руху автомобіля  $V$

## Висновки

1. В умовах сучасного швидкісного інтенсивного руху дія транспортних засобів на дорожню конструкцію має істотно виражений динамічний характер, що приводить до збільшення навантажень на дорожні конструкції і зниження втомної довговічності асфальтобетонних покриттів. Динамічна дія транспортного потоку на дорожню конструкцію обумовлена нерівністю дорожнього покриття і швидкісними режимами руху. Пропонується проводити розрахунок динамічних характеристик навантаження дорожнього покриття на основі розробленої математичної моделі системи “автомобіль – дорога” та зіставляти теоретичні результати з отриманими при експериментальних вимірюваннях.

2. Запропоновано математичну модель взаємодії транспортних засобів з нерівностями поверхні дорожнього покриття, яка представлена у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь. Наведено методику та результати числового розв’язання цих рівнянь за допомогою ПЕОМ.

3. Методом планування багатofакторного експерименту отримано неповне квадратичне рівняння регресії, яке дає змогу адекватно описати залежність коефіцієнта динамічності навантаження на покриття дорожнього одягу від дії колеса рухомого автомобіля  $K_d$  від параметрів: висоти нерівності на дорозі  $q$  та швидкості руху автомобіля  $V$  в такій області їхніх значень  $q=2\dots15$  мм,  $V=0\dots80$  км/год.

4. Побудовано поверхню відгуку, яка дає змогу наочно проілюструвати залежність коефіцієнта динамічності автомобіля  $K_d$  від параметрів: висоти нерівності на дорозі  $q$  та швидкості руху автомобіля  $V$  з метою вибору раціональних значень швидкості руху автомобіля на ділянках дороги з різною висотою нерівностей, яка може бути замірjana, наприклад, стандартною триметровою рейкою.

Необхідно продовжити дослідження з метою врахування кроку між нерівностями, жорсткості дорожніх одягів різних типів та інших факторів на величину зміни коефіцієнта динамічності. Отримані залежності повинні використовуватися при проектуванні конструкцій дорожнього одягу на динамічну дію навантаження.

1. Агейкин Я.С. *Взаимодействие автомобильного колеса с дорогой*. – М.,: МГИУ, 2001.–42с.
2. Бельский Ю.Б. *Влияние демпфирующих свойств шины на параметры колебаний автомобиля // Автомобильная промышленность*. – №12. – 1966, С.24–26.
3. Безбородова Г.Б., Галушко В.Г. *Моделирование движения автомобиля*. – К.: Вища школа, 1978.–166с.
4. Енаев А.А. *Колебания автомобиля при торможении и применение их исследования в проектных расчетах, технологии испытаний, доводке конструкций: Дис. ... д-ра техн. наук*. – М.: Московский государственный технический университет МАМИ, 2002.–440 с.
5. Hazelaar M. *Fahrwerkshwingen und komfort beurteilung bei kurzweiliger Anregung (Achsrauhigkeit)*. – Dusseldorf: VDI Verl. Cop, 1994.–184p.
6. Clark S.K., *The contact between tire and roadway, Ch. 5. NBS Monograph 122, Mechanics of pneumatic tires*. Clark SKed. NBS, Washington B.C. 1971. – 234 p.
7. Смирнов А.В. *Динамика дорожной одежды автомобильных дорог*. – Омск, Зап.–Сиб.изд-во, Омское отделение, 1975.– 146с.
8. Илиполов С.К., Селезнев М.Г., Углова Е.В. *Динамика дорожных конструкций*. – Ростов-на-Дону: Юг, 2002.– 260с.
9. Самарский А.А. *Введение в численные методы*.– М.: Наука, 1983.–272с.
10. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. – М., Наука, 1976.–280 с.
11. Гамеляк І.П. *Оцінка руйнування доріг від руху транспортних засобів з врахуванням нерівностей покриття // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. – К., НТУ, № 70. – 2004. – С.70–82.