

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ ПОВЕРХНІ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ З НЕРІВНОСТЯМИ

І.П. Гамеляк, І.В. Коц, О.В. Березюк, Я.М. Якименко

### Постановка проблеми

Забезпечення нормального експлуатаційного стану автомобільних доріг є одним з найважливіших завдань дорожньої служби. Швидкість, безпека та комфорт руху, економічні показники роботи транспорту в першу чергу залежать від стану покриття. Характер і ступінь впливу покриття на умови руху автомобілів визначається насамперед рівністю та зчпними 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 зчпні 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 даній роботі.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Потрібно зробити висновок, що переважна більшість вчених, що займаються конструкціями автомобілів, надійністю експлуатації, паливною економічністю автомобілів, в більшості випадків, не розглядають вплив фактора нерівної дороги і параметрів підресорювання на досліджувані параметри [1, 3-6].

При розрахунку різноманітних параметрів і характеристик автомобілів при русі 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 - проведення аналізу відомих способів експериментальних досліджень коливальних процесів в процесі руху автомобілів і теоретичні основи визначення динамічних зусиль від шин рухомих транспортних засобів.

З розглянутого стану питання і відповідно до мети виконуваної роботи були сформульовані наступні задачі досліджень:

1. Розробка 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. Розробка програмного забезпечення для проведення чисельного експерименту із визначення коефіцієнта динамічності при проїзді різних типів транспортних засобів по покриттях з нерівностями згідно запропонованих математичних моделей 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 коефіцієнту 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.

Аналіз відомих даних про величину динамічних навантажень на покриття, які були отримані в результаті досліджень проведених в ряді науково-дослідних організацій [4, 6, 8],

знаходяться в значному протиріччі і мають певні розходження. Саме це і спонукало зробити нову серію досліджень. Робота була розпочата 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, приведена на рис. 1, описується наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} m_0 \ddot{y}_0 + \eta_1 (\dot{y}_0 - \dot{y}_1) + c_0 y_0 + c_1 (y_0 - y_1) + F'_{\text{сyx}} \text{sign}(\dot{y}_0) + \eta_0 \dot{y}_0 = -\dot{q} \eta_1 - q c_1; \\ m_1 \ddot{y}_1 + \eta_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + \eta_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_0) + c_2 (y_1 - y_2) + c_1 (y_1 - y_0) = \\ = F_{\text{сyx}} \text{sign}(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + \eta_1 q + c_1 q; \\ m_2 \ddot{y}_2 + \eta_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c_2 (y_2 - y_1) = -F_{\text{сyx}} \text{sign}(\dot{y}_2 - \dot{y}_1); \\ q = q_0 (1 - \cos(vt)); \\ \dot{q} = q_0 v \sin(vt); \\ v = \frac{2\pi V}{S}, \end{cases} \quad (1)$$

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

Систему вихідних рівнянь вирішували методами чисельного інтегрування на ПЕОМ. Розрахунок динамічної дії автомобіля на дорожній одяг виконували за формулою:

$$P_d = c_1 [(1 - \cos(vt))q_0 - y_0 - y_1] + \eta_1 (q_0 v \sin(vt) - \dot{y}_0 - \dot{y}_1). \quad (2)$$

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 була складена програма на алгоритмічній мові програмування Delphi 6. В 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.

Система диференціальних рівнянь (1), які описують силову взаємодію автомобіля та дорожнього покриття і представляють 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 в вищезгаданих рівняннях логічних функцій, зокрема функцій знака у силі сухого тертя, що ускладнює аналітичне їх розв'язання, а також суттєві 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 суттєві нелінійності дозволяють зробити висновок щодо необхідності застосування чисельних методів розв'язання цієї системи диференціальних рівнянь. В результаті детального аналізу різних чисельних методів розв'язання диференціальних рівнянь подібного виду 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 Delphi 6 в операційному середовищі Windows 98 чи XP.

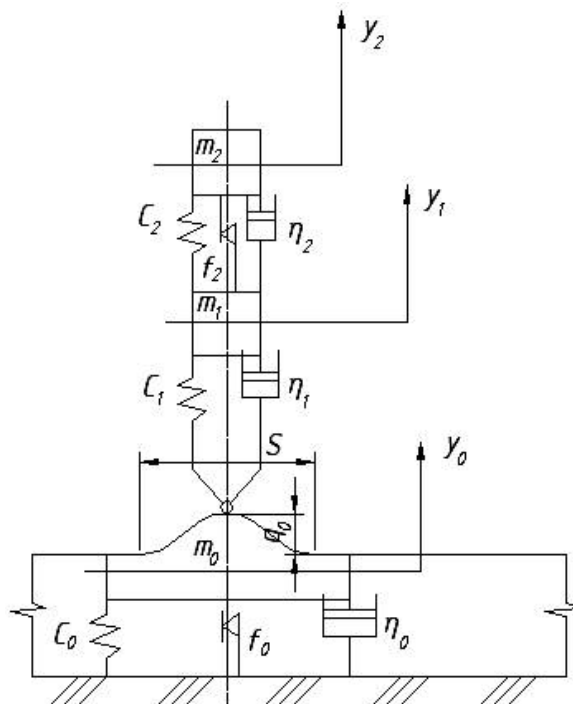


Рис. 1. Розрахункова схема автомобіля і дорожнього одягу

Згідно відповідного алгоритму, було складено програму "Матмодель", яка дозволяє вводити значення параметрів силової взаємодії автомобіля та дорожнього покриття й отримувати відповідні результати у вигляді графіків та таблиць.

На рис. 2 представлено 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 таким чином: 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 спадаюче підменю (рис. 2,б), і після вибору команди **Дорожній одяг** програма переходить в режим розв'язку 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

відносно похибкою  $\varepsilon=10^{-8}$ . Стійкість розв'язку систем диференціальних рівнянь забезпечувалась перевіркою на ідентичність результатів, отриманих при значеннях кроків інтегрування  $h$  та  $h/2$ .

З метою порівняння результатів, отриманих за допомогою програми "Матмодель", систему диференціальних рівнянь (1) було також розв'язано в середовищі MathCAD з використанням стандартної функції **rkfixed** (рис. 3). На рис. 4 показано співставлення цих результатів, що свідчить про правильність чисельного розв'язання математичної моделі взаємодії транспортних засобів з нерівностями поверхні дорожнього покриття.

Перевірку результатів теоретичних досліджень було здійснено на підставі співставлення із результатами відомих експериментальних даних після обробки їх методами планування багатофакторного експерименту при визначенні цільової функції – коефіцієнту динамічності силового навантаження дорожнього одягу від дії шин рухомого автомобіля.

Досліджено також залежність величини коефіцієнту динамічності навантаження дорожнього одягу від довжини нерівності на дорозі в діапазоні значень 0,75-25 м (рис. 5).

Значення величини коефіцієнту динамічності навантаження дорожнього одягу є функцією 2-х 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 об'ємами 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].

Вибір діапазонів варіювання факторів функцій (4) проводився таким чином, щоб будь-яка їх сукупність в 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.

Таблиця

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

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

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

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

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

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

Таким чином, регресійна залежність коефіцієнту динамічності автомобіля від висоти нерівності на дорозі та швидкості руху автомобіля являє собою неповну квадратичну модель. Графічно ця залежність являє поверхню, зображену на рис. 6.

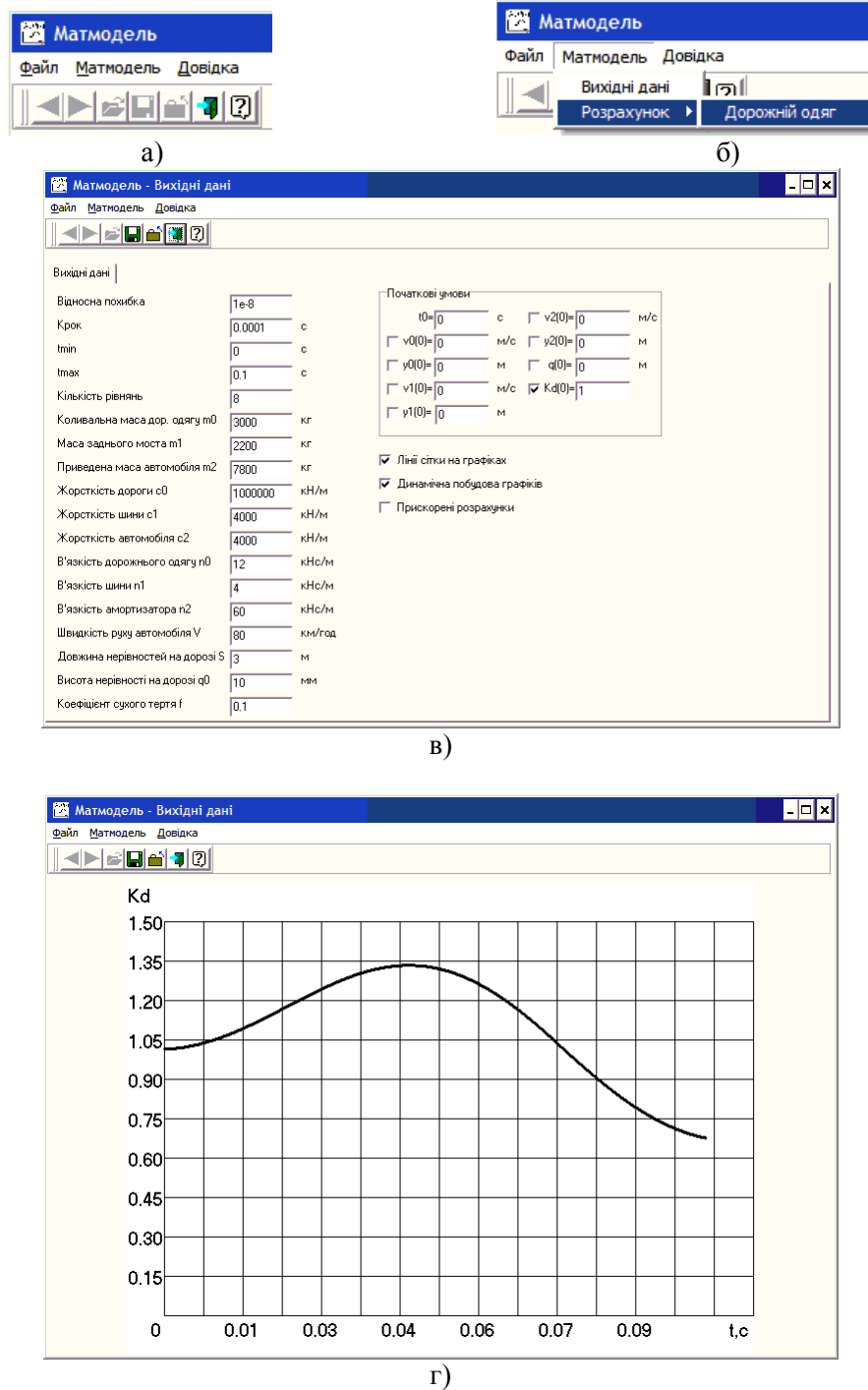


Рис. 2. Загальний вигляд вікна програми імітаційного моделювання «Матмодель»: а) головне меню та панель інструментів; б) пункти меню; в) введення вихідних даних; г) результати роботи програми

Попередній аналіз результатів розрахунку показав, що значення  $K_d$  при висоті нерівності до 15 мм на базі 3 м зростали при збільшенні 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.

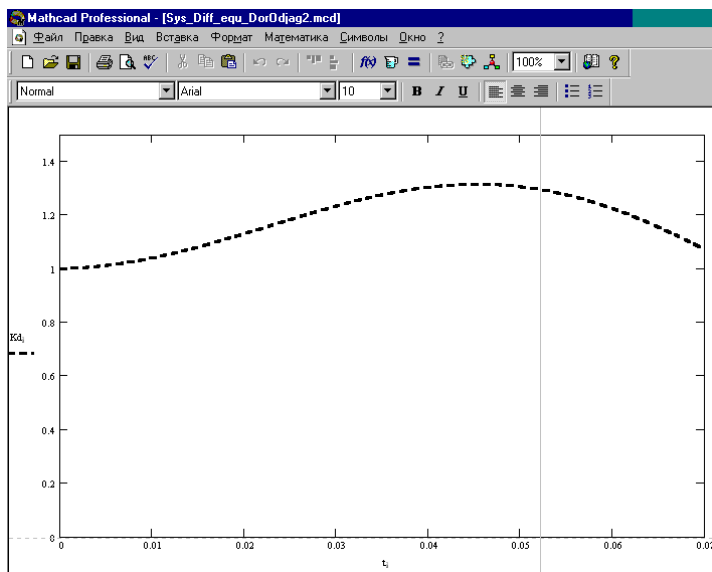


Рис. 3. Результати дослідження математичної моделі в середовищі MathCAD

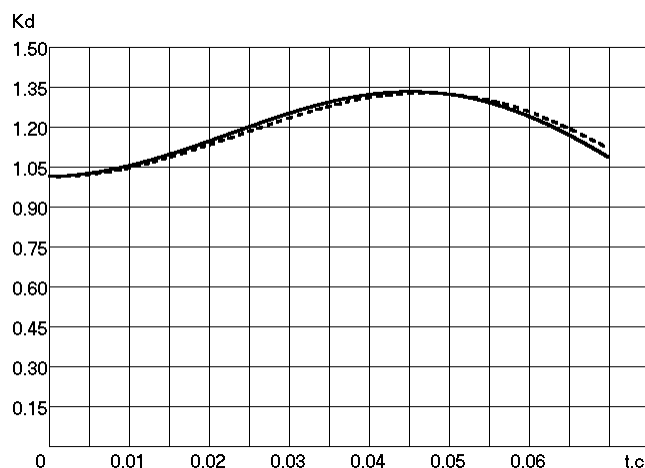


Рис. 4. Порівняння результатів чисельного дослідження математичної моделі взаємодії транспортних засобів з нерівностями поверхні дорожнього покриття за допомогою програми "Матмодель" (—) та в середовищі MatCAD (---)

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

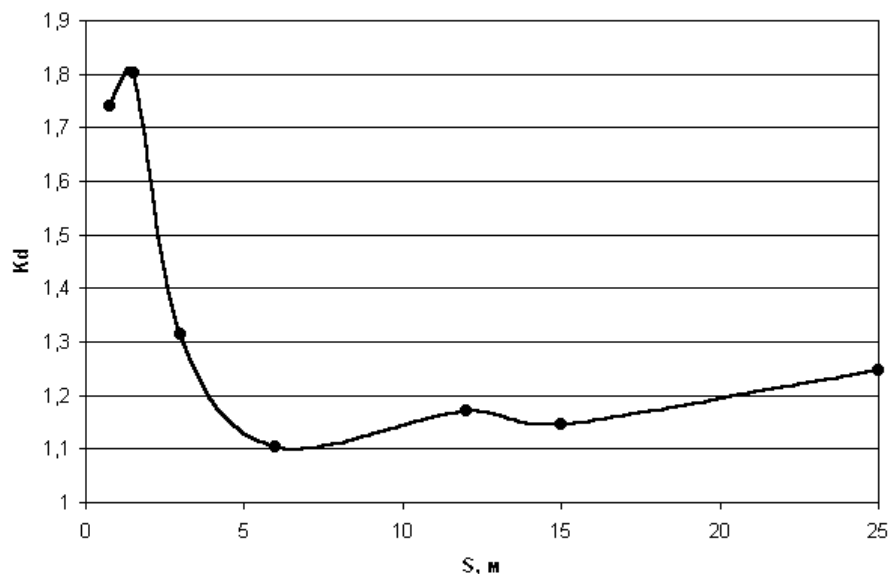


Рис. 5. Залежність величини коефіцієнту динамічності навантаження дорожнього одягу  $K_d$  від довжини нерівності на дорозі  $S$

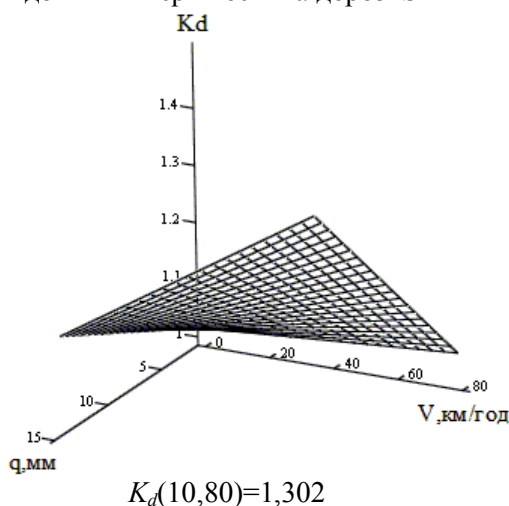


Рис. 5. Поверхня відгуку коефіцієнту динамічності навантаження дорожнього одягу  $K_d$  від дії рухомого автомобіля в площині дійсних значень параметрів: висоти нерівності на дорозі  $q$  та швидкості руху автомобіля  $V$

### Висновки

- 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 співставляти теоретичні результати з отриманими при експериментальних вимірюваннях.
- Запропоновано математичну модель взаємодії транспортних засобів з нерівностями поверхні дорожнього покриття, яка представлена у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь. Наведено методику та результати чисельного розв'язання цих рівнянь за допомогою ПЕОМ. Співставлено результати розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь із використанням пакетів прикладних програм, що входять до складу MathCAD 2000 і Delphi 6.
- Методом планування багатofакторного експерименту отримано неповне квадратичне рівняння регресії, яке дозволяє адекватно описати залежність коефіцієнту 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 їх значень  $q=2...15$  мм,  $V=0...80$  км/год.

- Побудовано поверхню відгуку, яка дозволяє наглядно проілюструвати залежність коефіцієнту 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 заміряна, наприклад, стандартною трьохметровою 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.

### Використана література

1. Агейкин Я.С. Взаимодействие автомобильного колеса с дорогой. – М.: МГИУ, 2001. – 42 с.
2. Беленький 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. – 166 с.
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. – 184 p.
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. – 146 с.
8. Илиополов С.К., Селезнев М.Г., Углова Е.В. Динамика дорожных конструкций. – Ростов-на-Дону: Юг, 2002. – 260 с.
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.

**Гамеляк Ігор Павлович** – д.т.н., професор кафедри ДБМ і хімії, Національний транспортний університет

**Якименко Ярослав Миколайович** – аспірант кафедри ДБМ і хімії, Національний транспортний університет

**Коц Іван Васильович** – к.т.н., доцент, науковий керівник і завідувач науково-дослідної лабораторії гідродинаміки, Вінницький технічний національний університет

**Березюк Олег Володимирович** – к.т.н., старший викладач кафедри менеджменту у будівництві, охорони праці та безпеки життєдіяльності, Вінницький технічний національний університет