

Роман С.В., канд. техн. наук, Кизима С.С., канд. техн. наук

ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ВИТРАТ АВТОМОБІЛЯМИ ПАЛИВА В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД СТАНУ ПРОЇЗНОЇ ЧАСТИНИ В УМОВАХ ДОРОЖНІХ МЕРЕЖ МІСЬКИХ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ

Витрати автомобілями палива у процесі здійснення автотранспортних перевезень є однією із основних складових, які формують собівартість перевезень і, як наслідок, кінцеву ефективність функціонування всього народногосподарського комплексу країни. Важливу роль у формуванні собівартості перевезень відіграє рівень транспортно-експлуатаційного стану дорожньої мережі, інтегральним показником якого є показник рівності проїзної частини. Зв'язок між собівартістю перевезень і рівністю проїзної частини реалізується саме через вплив різного роду нерівностей на проїзній частині на витрати автомобілем палива під час їх подолання у процесі підтримання руху. Численними дослідженнями [1, 2] доведено, що собівартість перевезень з погіршенням рівності проїзної частини може зростати в 2 – 3 рази. Тому встановлення математичних зв'язків для прогнозування витрат автомобілями палива в процесі руху в залежності від рівності проїзної частини доріг, умов роботи та властивостей їх дорожніх конструкцій є надзвичайно важливим в дорожній практиці для підвищення обґрунтованості рішень при плануванні дорожньо-ремонтних робіт на які дорожні господарства витрачають величезні фінансові та матеріальні ресурси.

Зазначена проблема практично вирішена для умов реалізації автотранспортного процесу на мережі доріг загального користування. Відповідні математичні моделі покладені в основу вітчизняної системи управління станом покриттів (СУСП), розробленої групою вчених НТУ під керівництвом проф. Кизими С.С. [3].

На відміну від позаміських умов, зазначена задача залишається не вирішеною для умов руху автомобілів на мережі доріг міських населених пунктів, оскільки спеціальних системних досліджень у цьому напрямку для міських умов з їх специфікою практично не проводилося.

З теорії автомобіля відомо, що паливні показники роботи транспортних засобів визначаються обсягами поточної ефективної потужності, яку витрачає їх двигун для подолання сил протидії руху – опору коченню, опору повітря, сил інерції та ін. [4, 5]. У процесі руху, сили опору руху не залишаються постійними і залежать від моделі автомобіля та швидкості його руху, рівності проїзної частини, параметрів геометричних елементів міських вулиць і доріг та ін. Отримана нами в [2] формула для визначення витрат автомобілем палива в умовах його рівномірного руху має вигляд

$$Q = \frac{\left[(G_{авт} + G_{вант} \cdot k_{вант}) \cdot (f_0 + 2,96 \cdot 10^{-8} \cdot S \cdot V^2 \pm i) + \frac{k \cdot F \cdot V^2}{13} \right] \cdot g_e}{270 \cdot \eta \cdot \rho_n}, \quad (1)$$

де g_e – поточні питомі витрати двигуном автомобіля палива, $г/ек.с.год$;

де $G_{авт}$ і $G_{вант}$ – відповідно вага автомобіля і вантажу, $кг$;

$K_{авт}$ – коефіцієнт використання вантажопідйомності автомобіля;

f_0 – коефіцієнт опору коченню, при русі автомобіля по умовно абсолютно рівній дорозі із швидкістю близькій до нуля;

S - показник рівності проїзної частини, $см/км$;

V - швидкість руху автомобіля, $км/год$.;

i – поздовжній ухил дороги;

$k \cdot F$ – фактор опору повітряного середовища. Значення цього фактору, для різних типів автомобілів приймають за [5];

ρ_n – об'ємна вага пального, $г/літр$;

η – коефіцієнт корисної дії трансмісії автомобіля.

Поточні питомі витрати двигуном автомобіля палива g_e визначають за навантажувальними характеристиками двигуна автомобіля. В табл. 1 наведені поліноміальні моделі навантажувальних характеристик двигунів автомобілів ГАЗ-24, ЗІЛ-130, ВАЗ-2103, які були отримані експериментальним шляхом в [6] в залежності від обертового моменту на валу двигуна M_k і частоти обертів двигуна n .

Таблиця 1 – Моделі навантажувальних характеристик двигунів автомобілів

Модель автомобіля	Математичний вираз, який описує навантажувальні характеристики двигуна автомобіля
ВАЗ-2103	$g_e = 1198,7 - 0,17674 \cdot n - 18,306 \cdot M_{\kappa} + 0,22222 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 + 0,1125 \cdot M_{\kappa}^2 + 0,45098 \cdot 10^{-3} \cdot M_{\kappa} \cdot n$
ГАЗ-24	$g_e = 871,68 + 0,013585 \cdot n - 10,175 \cdot M_{\kappa} - 0,48377 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + 0,04136 \cdot M_{\kappa}^2 + 0,12478 \cdot 10^{-3} \cdot M_{\kappa} \cdot n$
ЗІЛ-130	$g_e = 1246,3 - 0,23408 \cdot n - 6,0274 \cdot M_{\kappa} + 0,83807 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 + 0,12448 \cdot M_{\kappa}^2 - 0,19858 \cdot 10^{-3} \cdot M_{\kappa} \cdot n$

Враховуючи те, що рух на міських вулицях і дорогах постійно протікає в умовах тісної взаємодії транспортних засобів між собою, розрахунки витрат ними палива необхідно виконувати на основі закономірностей зміни швидкісних режимів руху автомобілів [7, 8], а саме – з використанням характеристик їх розподілу – математичного чекання швидкості руху $V_i - MV$ і середньоквадратичного відхилення швидкостей руху від їх середніх значень – σ_v . При цьому, враховуючи різну економічну обстановку на міських вулицях і дорогах різних груп, всі необхідні розрахунки необхідно проводити окремо для кожної із них. Останні згідно [.....] поділяються на групи А, Б і В. Це дозволить найбільш повно врахувати вплив стану проїзної частини міських вулиць і доріг різних груп та рівня завантаженості їх рухом на формування паливних показників роботи рухомого складу транспорту. Необхідні математичні моделі для прогнозування зміни параметрів швидкісних режимів міських вулиць і доріг різних груп, отримані нами, наведено нижче.

$$\left. \begin{aligned} MV^A &= 110,2 \cdot \exp[-0,0036 \cdot S_{cs} - (0,654 - 0,00338 \cdot S_{cs}) \cdot z] \\ \sigma_v^A &= (16,79 - 0,0477 \cdot S_{cs}) \cdot \left(1 - \frac{z}{1,1}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} MV^B &= 91,09 \cdot \exp[-0,0023 \cdot S_{cs} - (0,555 - 0,0021 \cdot S_{cs}) \cdot z] \\ \sigma_v^B &= (13,43 - 0,0372 \cdot S_{cs}) \cdot \left(1 - \frac{z}{1,1}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} MV^C &= 87,7 \cdot \exp[-0,00234 \cdot S_{cs} - (0,875 - 0,00223 \cdot S_{cs}) \cdot z] \\ \sigma_v^C &= (11,96 - 0,0316 \cdot S_{cs}) \cdot \left(1 - \frac{z}{1,1}\right) \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

де $S_{сз}$ - середньозважений показник рівності проїзної частини для міських вулиць і доріг з багатосмуговою проїзною частиною

$$S_{сз} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i \cdot \%N_{ni})}{100}; \quad (5)$$

S_i – показник рівності і-тої смуги руху;

$\%N_{ni}$ – відсоток автомобілів транспортного потоку, який рухається по і-тій смузі руху;

n – порядковий номер смуги руху.

Для міських вулиць і доріг з чотирьохсмуговою проїзною частиною $\%N_{ni}$ можна знайти за залежностями [9]

$$\left. \begin{aligned} \%N_{I\text{ см}} &= 60,512 \cdot \exp(-1,7 \cdot 10^{-5} \cdot N) \\ \%N_{II\text{ см}} &= 100 - \%N_{I\text{ см}} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

де $\%N_{I\text{ см}}$, $\%N_{II\text{ см}}$ – відсоток транспортних засобів, які рухаються по I-ій і II-ій смугах відповідно;

N – інтенсивність руху транспортних засобів на дорозі, *авт./год.*

На міських автомагістралях із шестисмуговою проїзною частиною процес розподілу руху по смугах значно складніший. В результаті спеціально проведених нами досліджень [10] для цих умов отримані наступні математичні моделі

$$\left. \begin{aligned} \%N_{I\text{ см}} &= N_{напр} \cdot \left[\begin{aligned} &12,48 \cdot 1,7283 \cdot N_{пiш}^{-0,4625} \cdot (-0,0393 \cdot \%_{нас}^2 + 0,4099 \cdot \%_{нас} + 0,349) \cdot \\ &(-0,347 \cdot P + 1,053) \cdot (-0,0682 \cdot L_p^2 + 0,3698 \cdot L_p + 0,6377) \cdot \\ &(6 \cdot 10^{-5} \cdot \%_{вант}^2 - 0,0139 \cdot \%_{вант} + 1,7146) \cdot (6,3833 \cdot z^2 - 5,8044 \cdot z + 2,1054) \end{aligned} \right]; \\ \%N_{II\text{ см}} &= N_{напр} \cdot \left[\begin{aligned} &50,606 \cdot (1,1156 \cdot z^2 - 0,4461 \cdot z + 0,6525) \cdot (-0,007 \cdot \%_{нас}^2 + 0,0842 \cdot \%_{нас} + 0,7871) \cdot \\ &(-0,0012 \cdot N_{пiш}^2 + 0,0263 \cdot N_{пiш} + 1,08) \cdot (-0,0098 \cdot L_p^2 + 0,0875 \cdot L_p + 0,8913) \cdot \\ &(0,0043 \cdot \%_{вант} + 0,9619) \cdot (-2 \cdot 10^{-6} \cdot i^2 + 0,0012 \cdot i + 0,9335) \cdot (-1 \cdot 10^{-5} \cdot S^2 + 0,0018 \cdot S + 1,1337) \end{aligned} \right]; \\ \%N_{III\text{ см}} &= 100 - \%N_{I\text{ см}} - \%N_{II\text{ см}}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де z – рівень завантаженості проїзної частини рухом;

$N_{пiш}$ – інтенсивність руху пішоходів на тротуарах, *пiш/хв.;*

$\%_{вант}$ – відсоток вантажних автомобілів у потоці;

$\%_{нас}$ – відсоток пасажирського транспорту у потоці;

S – рівність проїзної частини, $см/км$;

i – поздовжній ухил автомагістралі;

L_p – видимість дорожньої розмітки, *бали*;

P – наявність дозволу на тимчасову зупинки транспортних засобів в межах першої смуги.

Таким чином, подальше вирішення поставленої задачі зводиться до побудови математичного зв'язку $Q^m = f(MV, \sigma_v, S_{cs})$, де m – група міських вулиць і доріг (А, Б, В). Розрахунки виконували за такою методикою.

З використанням (2) – (4) для різних значень середньозваженого показника рівності проїзної частини міських вулиць і доріг та різних рівнів завантаженості їх проїзної частини рухом розраховували теоретичні значення параметрів розподілів швидкостей руху – математичне чекання MV^m і середньоквадратичне відхилення σ_v^m . Для кожного розподілу швидкостей руху із визначеними MV^m і σ_v^m розраховували середні значення швидкостей руху в інтервалах байдужості - \bar{V}_i . Кількість інтервалів байдужості в кожному із розподілів приймали рівною семи, а межі розмаху швидкостей руху $\pm 2\sigma_v$. З метою спрощення розрахунків витрат палива параметри потоку переносили на параметри економічно-розрахункового автомобіля, за який прийняли автомобіль ВАЗ-2106. Рішення щодо вибору економічно-розрахункового автомобіля прийняте на підставі того, що для даного автомобіля розроблені необхідні математичні моделі для визначення витрат його двигуном палива. З використанням (1) для кожного окремого інтервалу байдужості в залежності від \bar{V}_i , S_{cs} і z визначали обсяги витрат двигуном економічно-розрахункового автомобіля палива. Середні обсяги витрат палива економічно-розрахунковим автомобілем у межах кожного із розподілів швидкостей руху визначали за формулою

$$\bar{Q}_e = \sum_{i=1}^7 Q_i \cdot p_i, \quad (8)$$

де Q_i – витрати економічно-розрахунковим автомобілем палива при умові руху його із швидкістю, що відповідає середній швидкості i -го інтервалу байдужості;

p_i – відсоток транспортних засобів, які рухаються в потоці із швидкістю, що належить до i -го інтервалу байдужості. p_i визначали з використанням інтеграла імовірностей Лапласа за формулою:

$$\Phi[t] = \int_{V_1}^{V_2} V \cdot dV = \frac{1}{2} \cdot [f(t_2) - f(t_1)], \quad \%$$

де

$$t_1 = \frac{V_1 - MV}{\sigma_V}, \quad t_2 = \frac{V_2 - MV}{\sigma_V}, \quad f(t) = \sqrt{2\pi} \cdot \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt,$$

V_1, V_2 – значення швидкостей руху, які відповідають граничним значенням попереднього та наступного інтервалів байдужості закону розподілу.

Числові значення функції $f(t)$ визначали за додатком IV [11].

Наступний крок у проведенні розрахунків полягав у безпосередній побудові за розрахованими середніми обсягами витрат палива математичних залежностей $Q_e^m = f(S_{cs}, z)$.

Загальний вигляд функцій $Q_e^m = f(S_{cs}, z)$ приймали, виходячи із умови найменшої похибки апроксимування теоретичних даних. Розрахунки проводили з використанням ПЕОМ. На рис. 1 – 3 представлені графіки зміни середніх витрат палива економічно-розрахунковим автомобілем у залежності від трьох найбільш значимих факторів – групи міських вулиць і доріг, середньозваженого показника рівності їх проїзної частини та рівня завантаженості рухом.

Доведено, що для апроксимації зв'язків $Q_e^A = \psi(S_{cs}, z)$, $Q_e^B = \omega(S_{cs}, z)$ і $Q_e^C = \tau(S_{cs}, z)$ доцільно використовувати функції:

$$- Q_e^A = A \cdot z^2 + B \cdot z + C;$$

$$- Q_e^B = D \cdot z + E;$$

$$- Q_e^C = K \cdot \exp[M \cdot z].$$

Результати побудови математичних залежностей $Q_e^m = f(S_{cs}, z)$ для міських вулиць і доріг різних груп при фіксованих значеннях середньозваженого показника рівності їх проїзної частини наведені в табл. 2.

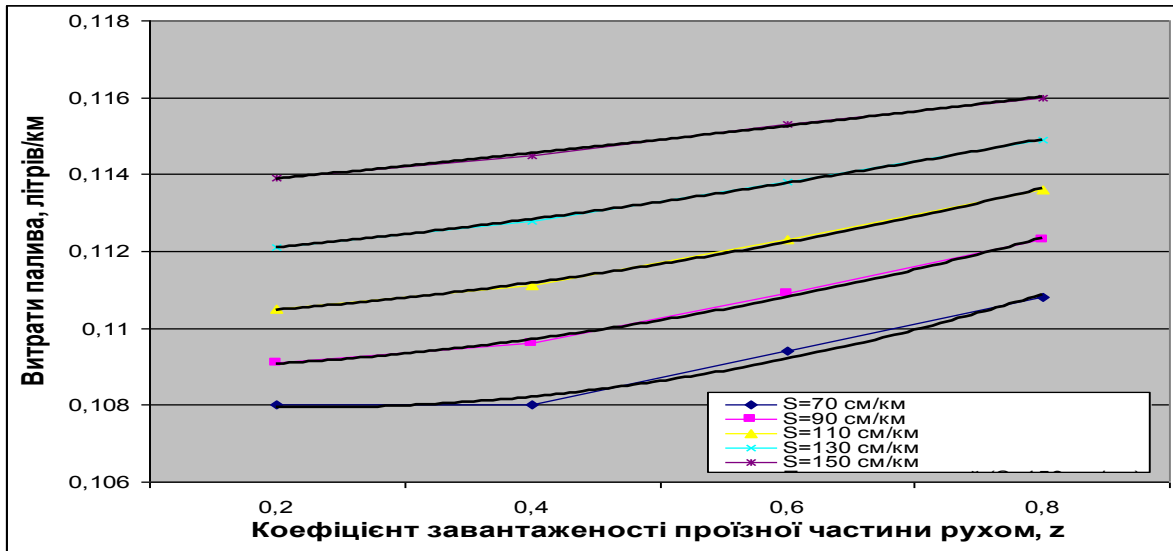


Рисунок 1 – Графічне представлення зв'язку $Q_e^A = \psi(S_{cs}, z)$

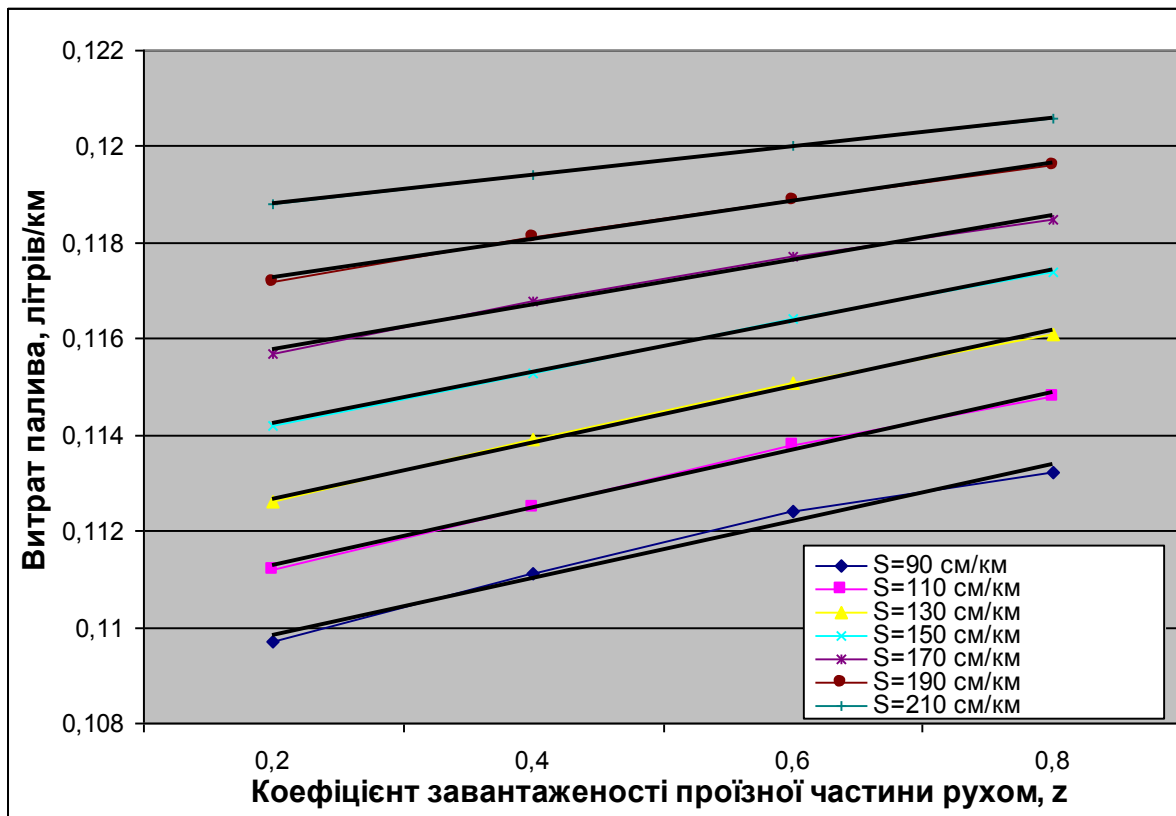


Рисунок 2 – Графічне представлення зв'язку $Q_e^B = \omega(S_{cs}, z)$

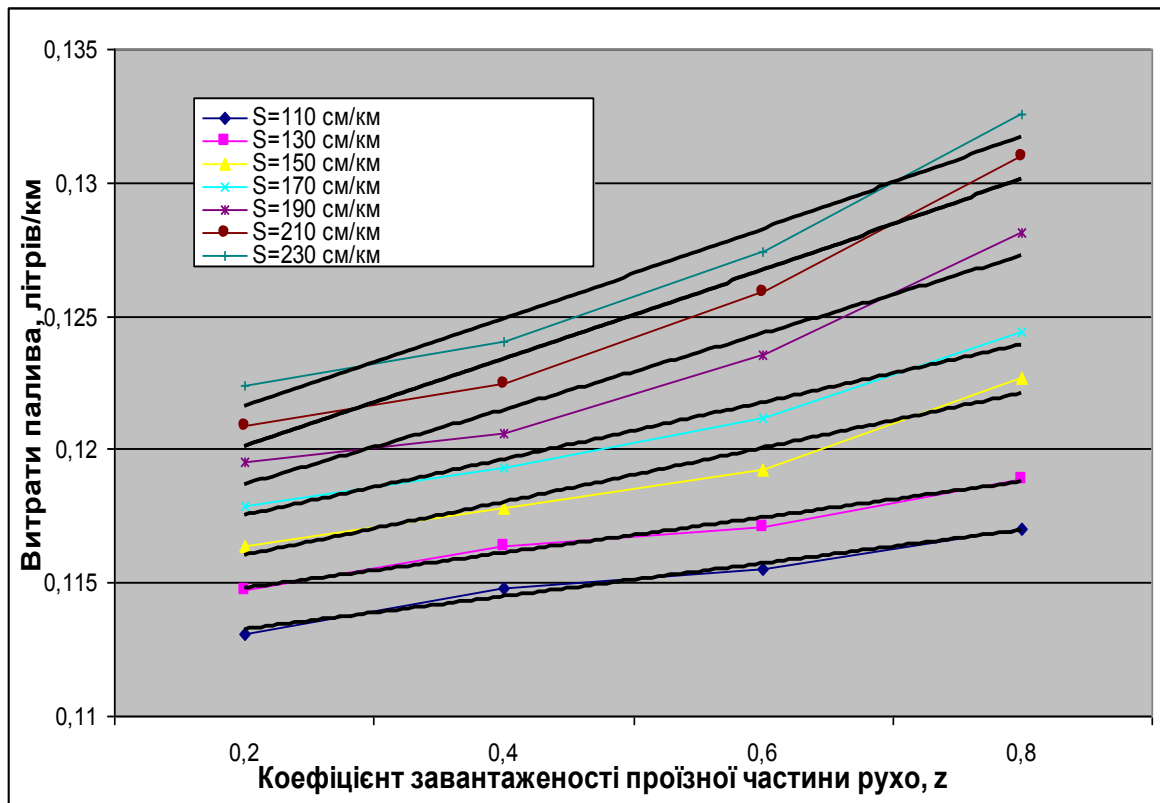


Рисунок 3 – Графічне представлення зв'язку $Q_e^B = \tau(S_{cs}, z)$

Таблиця 2 – Результати побудови математичних залежностей $Q_e^m = f(S_{cs}, z)$

Середньозважене значення показника рівності проїзної частини S_{cs} , см/км	Математична апроксимація зв'язку $Q_e^m = f(S_{cs}, z)$
1	2
Міські вулиці і дороги групи А	
70	$Q_e = 0,875 \cdot z^2 - 0,385 \cdot z + 10,835$
90	$Q_e = 0,5625 \cdot z^2 - 0,0175 \cdot z + 10,887$
110	$Q_e = 0,4375 \cdot z^2 + 0,0875 \cdot z + 11,012$
130	$Q_e = 0,25 \cdot z^2 + 0,22 \cdot z + 11,155$
150	$Q_e = 0,0625 \cdot z^2 + 0,2925 \cdot z + 11,327$
Міські вулиці і дороги групи Б	
90	$Q_e = 0,59 \cdot z + 10,865$
110	$Q_e = 0,605 \cdot z + 11,005$
130	$Q_e = 0,585 \cdot z + 11,15$

Кінець табл. 2

1	2
150	$Q_e = 0,535 \cdot z + 11,315$
170	$Q_e = 0,465 \cdot z + 11,485$
190	$Q_e = 0,4 \cdot z + 11,645$
210	$Q_e = 0,3 \cdot z + 11,82$
Міські вулиці і дороги групи В	
110	$Q_e = 11,203 \cdot \exp[0,0539 \cdot z]$
130	$Q_e = 11,349 \cdot \exp[0,0569 \cdot z]$
150	$Q_e = 11,405 \cdot \exp[0,0824 \cdot z]$
170	$Q_e = 11,546 \cdot \exp[0,0884 \cdot z]$
190	$Q_e = 11,595 \cdot \exp[0,1125 \cdot z]$
210	$Q_e = 11,691 \cdot \exp[0,126 \cdot z]$
230	$Q_e = 11,822 \cdot \exp[0,1348 \cdot z]$

Графіки математичних зв'язків "A-S_{сз}", "B-S_{сз}" і "C-S_{сз}" для доріг групи А, зв'язків "D-S_{сз}" і "E-S_{сз}" для доріг групи Б і зв'язків "K-S_{сз}" і "M-S_{сз}" для доріг групи В, побудованих за даними табл. 2, представлені на рис. 4 – 10.

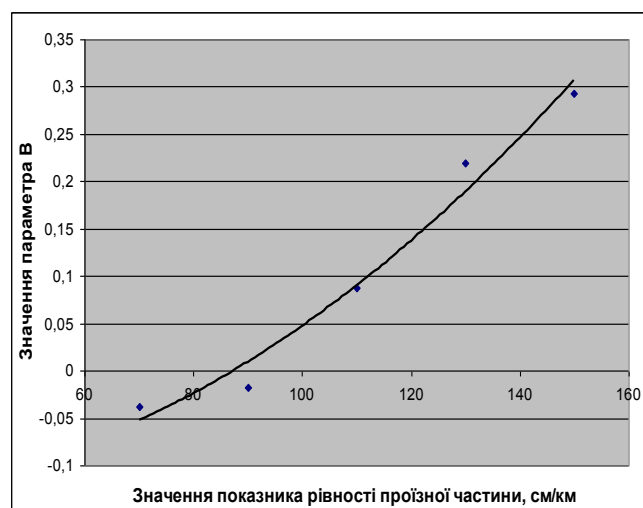
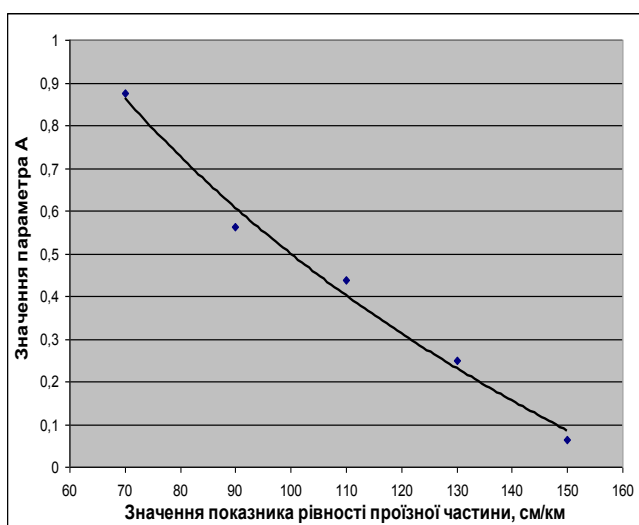


Рисунок 4 – Графік зв'язку "A-S_{сз}"

Рисунок 5 – Графік зв'язку "B-S_{сз}"

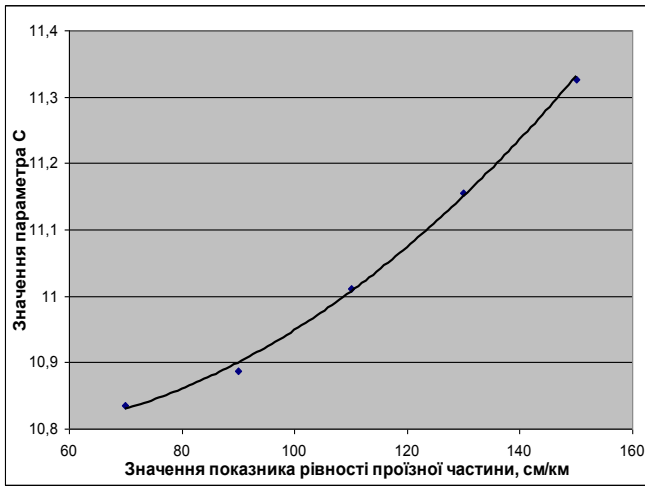


Рисунок 6 – Графік зв'язку " $C - S_{сз}$ "

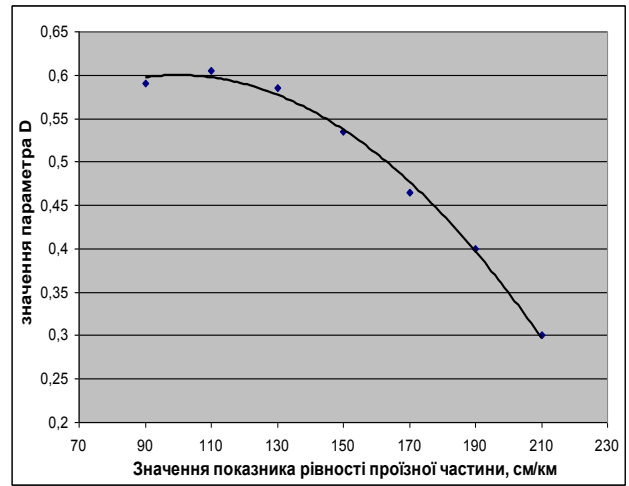


Рисунок 7 – Графік зв'язку " $D - S_{сз}$ "

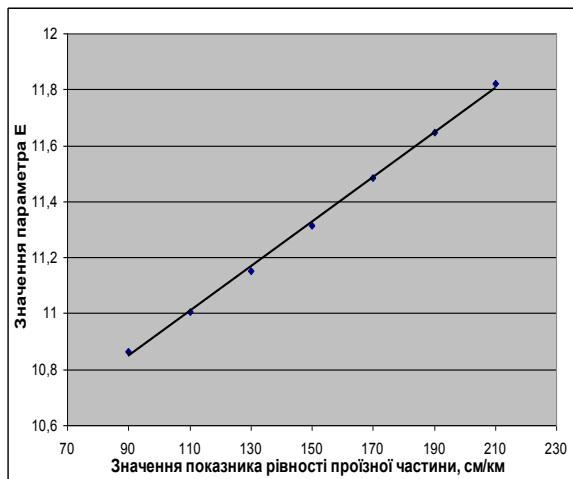


Рисунок 8 – Графік зв'язку " $E - S_{сз}$ "

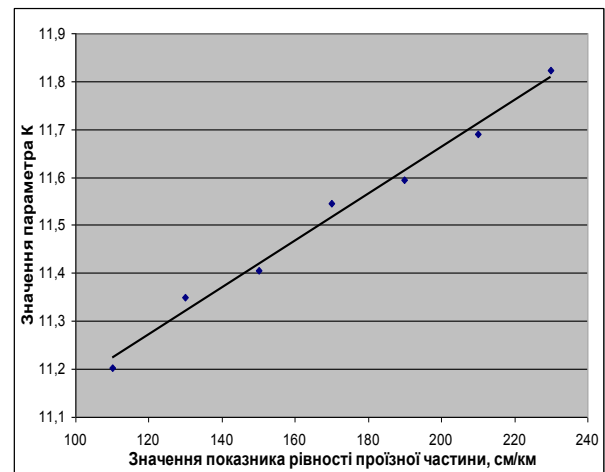


Рисунок 9 – Графік зв'язку " $K - S_{сз}$ "

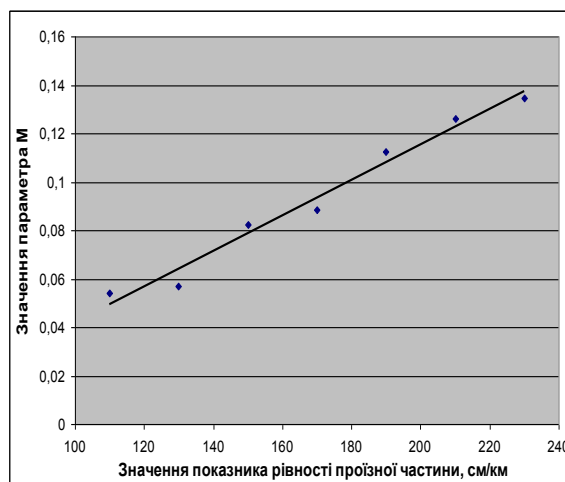


Рисунок 10 – Графік зв'язку " $M - S_{сз}$ "

Результати побудови математичних зв'язків, зображених на рис. 4 – 10, наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати побудови математичних зв'язків зміни параметрів функціональних залежностей $Q_e^m = f(S_{cs}, z)$

Група міських вулиць і доріг	Параметр	Функціональна залежність
А	A	$A = -1,0219 \cdot \ln S_{cs} + 5,2025$
	B	$B = 2 \cdot 10^{-5} \cdot S_{cs}^2 - 0,0006 \cdot S_{cs} - 0,1226$
	C	$C = 5 \cdot 10^{-5} \cdot S_{cs}^2 - 0,0039 \cdot S_{cs} + 10,875$
Б	D	$D = 3 \cdot 10^{-5} \cdot S_{cs}^2 - 0,005 \cdot S_{cs} + 0,3496$
	E	$E = 0,008 \cdot S_{cs} + 10,126$
В	K	$K = 0,0049 \cdot S_{cs} + 10,687$
	M	$M = 0,0007 \cdot S_{cs} - 0,0312$

Із врахуванням формул, наведених в табл. 2 і 3, після елементарних арифметичних дій, функції для визначення витрат економічно-розрахунковим автомобілем палива в літрах/100км у залежності від середньозваженого показника рівності проїзної частини міських вулиць і доріг та рівня завантаженості їх рухом, мають остаточний вигляд:

- для міських вулиць і доріг групи А

$$Q_e^A = \left[\begin{aligned} &(-1,022 \cdot \ln S_{cs} + 5,203) \cdot z^2 + (2 \cdot 10^{-5} \cdot S_{cs}^2 - 6 \cdot 10^{-4} \cdot S_{cs} - 0,1226) \cdot z + \\ &+ 5 \cdot 10^{-5} \cdot S_{cs}^2 - 0,0039 \cdot S_{cs} + 10,88 \end{aligned} \right]; \quad (9)$$

- для міських вулиць і доріг групи Б

$$Q_e^B = (3 \cdot 10^{-5} \cdot S_{cs}^2 + 0,005 \cdot S_{cs} + 0,35) \cdot z + 0,008 \cdot S_{cs} + 10,126; \quad (10)$$

- для міських вулиць і доріг групи В

$$Q_e^B = (0,005 \cdot S_{cs} + 10,678) \cdot \exp[(7 \cdot 10^{-4} \cdot S_{cs} - 0,031) \cdot z]. \quad (11)$$

Математичні моделі (9) – (11) отримані для прогнозування витрат палива економічно-розрахунковим автомобілем. Методика приведення автомобілів інших вагових груп до економічно-розрахункового розроблена нами в [10]. Отримані математичні моделі дозволяють вирішувати техніко-економічні задачі при обґрунтуванні програм дорожньо-ремонтних робіт для умов міських населених пунктів.

Література

1. Філіпов В.В. Вплив дорожніх умов на собівартість перевезень / Філіпов В.В. // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво : зб. наук. праць : Вип. 49. – К. : Будівельник, 1991. – С. 122 – 127.
2. Роман С.В. До формування транспортної складової дорожньо-транспортних витрат як функції стану проїзної частини в специфічних умовах міських населених пунктів / С.С. Кизима, С.В. Роман // Містобудування та територіальне планування : зб. наук. праць : Вип. 21. – К. : КНУБА, 2005. – С. 131 – 139.
3. Кизима С.С., Канін О.П., Лихоступ М.М. Структура та технічні можливості вітчизняної системи управління станом покриттів. // Нові технології в будівництві та експлуатації автомобільних доріг. – Харків. – 2002.
4. Абрамчук Ф.І. Автомобільні двигуни : [підруч. для студ. вищ. навч. закл. 2-ге вид.] / Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долгунов К.Є., Тимченко І.І. – К. : Арістей, 2004. – 476 с.
5. Краткий автомобильный справочник (НИИАТ) : [справочник 10-е изд. перераб. и доп.] / Министерство Автомобильного Транспорта РСФСР. – М. : Транспорт, 1983. – 220 с.
6. Шилова Т.А. Обоснования мероприятий по улучшению условий движения на улично-дорожных сетях городов с учетом расхода топлива : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.23.14 «Строительство автомобильных дорог» / Шилова Т.А. – К., 1987. – 149 с.
7. Лобашов А.О. О прогнозирование скорости транспортных потоков на городских улицах / Лобашов А.О. // Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета : Вып. 10. – Х., 1999. – С. 91 – 93.
8. Романов А.Г. Дорожное движение в городах. Закономерности и тенденции / Романов А.Г. – М. : Транспорт, 1984. – 80 с.
9. Красников А.Н. Закономерности движения на многополосных автомобильных дорогах / Красников А.Н. – М. : Транспорт, 1988. – 111 с.
10. Роман С.В. Удосконалення методів обґрунтування ремонтно-експлуатаційних робіт на вулично-дорожніх мережах міських населених пунктів : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.22.11 «Автомобильные дороги и аэродромы» / Роман С.В. – К., 2009. – 240 с.
11. Методика статистической обработки экспериментальных данных : РТМ 44-62. – М., 1966. – 101 с.