



- © В.В. Філіппов, докт. техн. наук, професор,
- © Н.В. Смірнова, канд. техн. наук, доцент,
- © Д.М. Леонтьєв, канд. техн. наук, доцент (ХНАДУ)

## ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВИТРАТИ ПАЛЬНОГО ВІД ДОРОЖНІХ УМОВ

**Анотація.** Проаналізовано та уточнено залежності витрати палива при впливі на нього швидкості руху автомобіля і дорожніх умов. Результати досліджень дозволяють підвищити точність і достовірність висновків про перевагу прийнятого до будівництва варіанта реконструкції або капітального ремонту дороги. Наведено результати моделювання.

**Ключові слова:** автомобільна дорога, режими руху автомобілів, швидкість руху автомобілю, витрата пального.

**Аннотация.** Проанализированы и уточнены зависимости расхода топлива при влиянии на него скорости движения автомобиля и дорожных условий. Результаты исследований позволяют повысить точность и достоверность выводов о преимуществе принятого к строительству варианта реконструкции или капитального ремонта дороги. Приведены результаты моделирования.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, режимы движения автомобилей, скорость движения автомобиля, расход топлива.

**Annotation.** Analyzed and refined fuel consumption dependence of vehicle speed and road conditions. The results allow to improve the accuracy and reliability of conclusions about the benefits of the option selected, whether construction or renovation overhaul of the road is chosen. The results of modelling are presented.

**Keywords:** road, traffic condition, the vehicle speed, fuel consumption.

### Вступ

При порівнянні проектних варіантів дороги, транспортні витрати оцінюють лише за істотно осередненими показниками, що безумовно знижує точність і достовірність висновків про перевагу прийнятого до будівництва варіанту дороги, варіанти її реконструкції або капітального ремонту. Витрата палива становить найбільшу частину в транспортних витратах і значно залежить від дорожніх умов. Звідси виникає актуальна задача підвищення точності та достовірності розрахунків, в першу чергу, саме витрат палива при пошуку оптимального варіанта проектного рішення будівництва, реконструкції або капітального ремонту дороги.

### Основна частина

Витрата палива, яка необхідна для руху по даній ділянці дороги, залежить як від параметрів дороги, так і параметрів автомобіля. Роль параметрів автомобіля у витраті палива детально вивчена в теорії автомобіля [1–3], в якій отримані досить точні для вирішення наших дорожніх завдань залежності витрати палива від заданої швидкості руху.

Швидкість руху водій встановлює відповідно до дорожніх умов, які визначаються планом і профілем дороги і показниками її експлуатаційного стану (рис. 1).

Моделюючи дії водія щодо вибору режиму руху автомобіля в транспортному потоці, отримують детальні графіки швидкості вздовж дороги, приклад яких показаний на рис. 2, узагальнюючі дорожні умови [4].

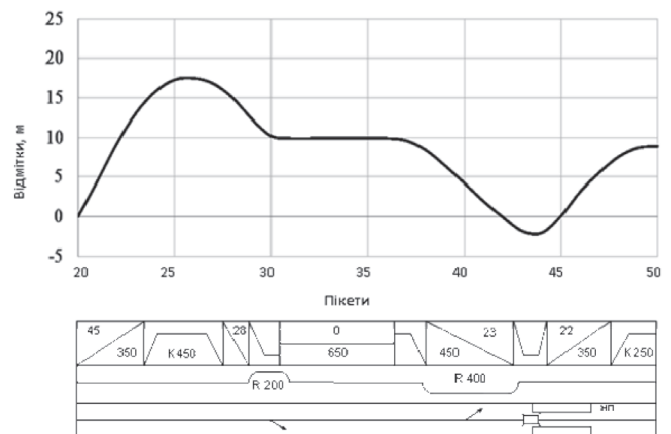


Рис. 1. План і поздовжній профіль дороги

Таким чином, вирішуючи завдання зміни витрати палива вздовж дороги, можна вважати обґрунтованими значення швидкості основних типів автомобілів з подібних графіків, які увійдуть як вихідні дані в залежності від витрати палива, що отримані в теорії автомобіля.

У цих залежностях крім швидкості входять змінні параметри дороги, які визначаються силами опору руху і витратами потужності на рух на даній ділянці дороги: це поздовжній похил ( $i$ ), коефіцієнт опору коченню ( $f$ ) і характеристика рівності проїзної частини – показники за поштовхоміром ( $S_p$ ).

Академік Е.А. Чудаков [1] визначив суму  $\psi = i + f$  як дорожній опір і досліджував паливо-

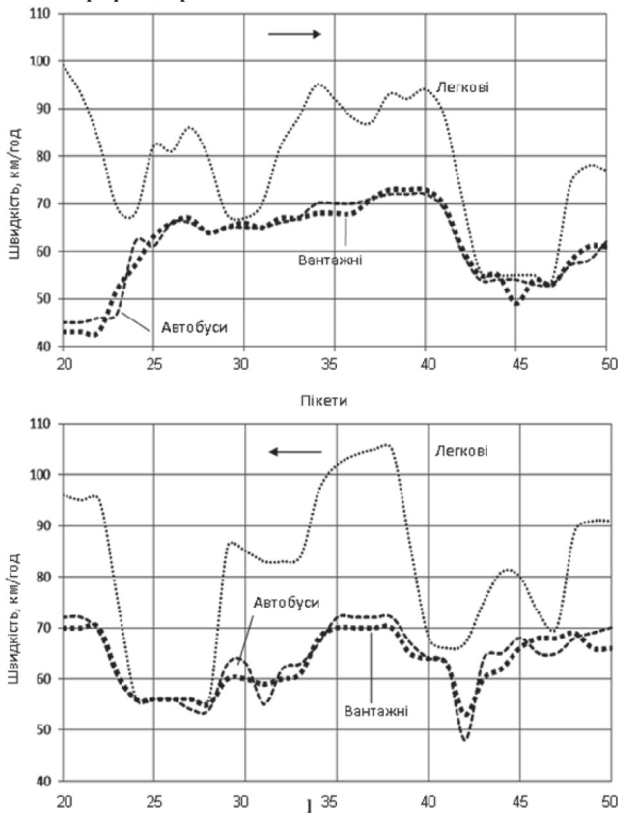


Рис. 2. Швидкості за типами автомобілів при інтенсивності 300 авт/год

економічні характеристики автомобіля як залежність витрати палива від дорожнього опору при постійних швидкостях руху.

Професор А.К. Біруля [5], досліджуючи залежності транспортно-експлуатаційних характеристик дороги від параметрів експлуатаційного стану, обґрунтував залежність коефіцієнта опору коченню  $f$  від характеристики рівності проїзної частини:

$$f = f_0 + \alpha \cdot S_p \cdot v^2, \quad (1)$$

де  $f_0$  – коефіцієнт опору коченню при малій швидкості (до 20 км/год);

$\alpha$  – коефіцієнт жорсткості підвіски автомобіля, що дорівнює  $5 \cdot 10^{-7}$  для легкових автомобілів і  $7 \cdot 10^{-7}$ , для інших;

$S_p$  – показники поштовхоміра, см/км.

Таким чином, у наступних залежностях витрати палива беруть участь: перше, всі параметри дороги і транспортних потоків, що визначили на даній ділянці дороги швидкість автомобіля і друге, параметри, які визначали сили опору руху і витрати потужності на рух на даній ділянці дороги (поздовжній похил, коефіцієнт опору коченню, рівність).

В основі розрахунку витрат палива, необхідного для подолання ділянки дороги довжиною  $s$  км зі швидкістю  $V$  км/год, лежить математична модель, запропонована в ХНАДУ [3] і побудована на синтезі рівнянь руху автомобіля і різних характеристик режимів роботи двигунів. Відповідно до цієї моделі

загальне рівняння витрати палива представлено у вигляді:

$$G_s = \frac{1}{\eta_i} (A \cdot i_k + B \cdot i_k \cdot V_a + C(G_a \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2 + 0,1\beta \cdot j \cdot G_a)), \quad (2)$$

де  $G_a$  – вага автомобіля, Н;

$V_a$  та  $j$  – швидкість автомобіля, км/год, і його прискорення або уповільнення, м/с<sup>2</sup>;

$kF$  – фактор обтічності, Нс<sup>2</sup>м<sup>-2</sup>,

$i_k$  – передавальне число коробки передач;

$\psi$  – дорожній опір;

$\eta_i$  – індикаторний ККД двигуна;

$A, B, C$  – коефіцієнти, які залежать від конструкції автомобіля ( $r_k$  – радіус кочення колеса,  $i_0$  – передавальне число головної передачі,  $\eta_{тр}$  – ККД трансмісії) і двигуна ( $S_k$  – хід поршня, параметрів палива ( $\rho_t$  – щільність палива, т/м<sup>3</sup>,  $H_n$  – нижчої теплоти згорання, кДж/кг) і розраховують за формулами:

– для дизелів:

$$A = \frac{381 \cdot V_h i_0}{H_n \rho_t r_k}, \quad B = \frac{11 \cdot V_h S_n i_0^2}{H_n \rho_t r_k^2}, \quad (2)$$

– для бензинових двигунів:

$$A = \frac{358 \cdot V_h i_0}{H_n \rho_t r_k}, \quad B = \frac{9 \cdot V_h S_n i_0^2}{H_n \rho_t r_k^2}. \quad (3)$$

Для тих і інших двигунів:

$$C = \frac{100}{H_n \rho_t \eta_{тр}}. \quad (4)$$

Наприклад, для автомобіля ЗІЛ-431410:  $A = 0.85$ ,  $B = 0.026$ ,  $C = 0.0035$ .

Індикаторний ККД двигуна в математичній моделі палива ХНАДУ запропоновано обчислювати залежно від відсотка використання потужності двигуна  $N_1$ , який залежить від дорожніх умов і швидкості автомобіля:

– для бензинових двигунів:

$$\eta_i \approx 0,272 + 0,0011 \cdot N_1, \quad (5)$$

– для дизелів:

$$\eta_i \approx 0,43 + 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot N_1 - 0,3 \cdot 10^{-4} \cdot N_1^2. \quad (6)$$

Відсоток використання потужності двигуна залежить від дорожніх умов та режиму руху автомобіля:

$$N_1 = 0,0277 (G_a \cdot \psi \cdot V_a + 0,077kF \cdot V_a^3 + 0,1\beta \cdot j \cdot G_a \cdot V_a) / (N_{\max} K_k \eta_{тр}), \quad (7)$$

де  $N_{\max}$  – максимальна потужність двигуна, кВт,  $K_k$  – коефіцієнт кореляції максимальної потужності двигуна, 0,9.

Далі наведений приклад розрахунку витрат палива вантажного автомобіля середньої вантажопідйомності



від дорожніх факторів. У прикладі розрахунку параметри автомобіля: власна маса  $m_a = 4520$  кг, вантажопідйомність  $m_{тр} = 5000$  кг, коефіцієнт використання вантажопідйомності  $\gamma = 0,8$ , вага автомобіля з вантажем  $G_a = (4520 + 5000 \cdot 0,8) \cdot 9,81 = 83581$  Н, максимальна потужність двигуна  $N_{max} = 110$  кВт (150 к.с.), радіус кочення колеса  $r_k = 0,48$  м, фактор обтічності  $k_F = 2,41$  Нс<sup>2</sup>м<sup>-2</sup>, передавальне число головної передачі  $i_0 = 6,32$ , передавальні числа коробки зміни передач від нижчої до вищої  $i_k$  (7,44; 4,10; 2,29; 1,47; 1,00). ККД трансмісії 0,85.

Параметри проїзної частини: поздовжній похил  $i = 0,02$ , коефіцієнт опору коченню  $f_0 = 0,015$ , показання за поштовхоміром  $S_p = 60$  см/км. Автомобіль рухається по даній ділянці рівномірно зі швидкістю 50 км/год (13,89 м/с) на четвертій передачі ( $i_k = 1,47$ ).

Розрахунок виконаний в наступній послідовності.

1. Коефіцієнт опору коченню з урахуванням його залежності від швидкості за Б.С. Фалькевич (у дужках) і показань поштовхоміра за А.К. Біруля:

$$f = f_0(1 + 0,00065v^2) + \alpha \cdot S_p \cdot v^2 = 0,015(1 + 0,00065 \cdot 13,88^2) + 7 \cdot 10^{-7} \cdot 60 \cdot 13,88^2 = 0,025.$$

2. Дорожній опір:  $\psi = i + f = 0,02 + 0,025 = 0,045$ .

3. Для автомобіля ЗІЛ-431410  $\eta_{тр} = 0,85$ , коефіцієнти:  $A = 0,85$ ,  $B = 0,026$ ,  $C = 0,0035$ .

4. Відсоток використання потужності двигуна:  
 $N_1 = 0,0277(G_a \cdot \psi \cdot V_a + 0,077kF \cdot V_a^3 + 0,1\beta \cdot j \cdot G_a \cdot V_a) / (N_{max} K_v \eta_{тр}) = 0,0277(83581 \cdot 0,045 \cdot 50 + 0,077 \cdot 2,41 \cdot 50^3) / (110 \cdot 0,9 \cdot 0,85) = 69,8\%$

$$\text{Індикаторний ККД двигуна: } \eta_i \approx 0,272 + 0,0011 \cdot N_1 = 0,272 + 0,0011 \cdot 69,8 = 0,35$$

Витрата палива:

$$G_s = \frac{1}{\eta_i} (A \cdot i_k + B \cdot i_k \cdot V_a + C(G_a \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2 + 0,1\beta \cdot j \cdot G_a)) = \frac{1}{0,35} (0,85 \cdot 1,47 + 0,026 \cdot 1,47 \cdot 50 + 0,00305(83581 \cdot 0,045 + 0,077 \cdot 2,41$$

Таким чином, на даній ділянці дороги  $G_s = 42,2$  л / 100 км.

На рис. 3 показані залежності витрати палива від швидкості, поздовжнього ухилу і при відмінній рівності проїзної частини.

Відмінний стан рівності “тримається” перші декілька років після будівництва або капітального ремонту. За строк 5–8 років показник рівності погіршується до критичних значень 100–150 см/км і підвищується при поточному середньому або капітальному ремонті.

Залежності витрати палива від рівності покриття проїзної частини в міжремонтні строки наведені на рис. 4.

Аналіз результатів розрахунків показав, що врахування зміни витрати палива автомобіля наприкінці міжремонтного строку дороги при русі по нерівній проїзній частині в порівнянні з новою дорогою або дорогою після капітального ремонту призводить до значного збільшення транспортних витрат.

Залежність витрати палива від рівності дороги при швидкостях до 50–60 км/год для навантажених автомобілів і до 70 км/год для порожніх автомобілів середньої вантажопідйомності практично лінійна.

$$G_s = a_v + b_v(S_p - 50), \quad (8)$$

де  $a_v$  – коефіцієнт, що залежить від швидкості руху автомобіля  $v$  і дорожніх умов;

$b_v$  – коефіцієнт пропорційності, який також залежить від швидкості руху автомобіля  $v$  і дорожніх умов.

Наприклад, при нульовому похилі для ЗІЛ-431410 в навантаженому стані при швидкості 60 км/год  $a_v = 3204$  л/100 км, а  $b_v = 0,111$  л/(100 км/(см/км)).

Для ділянок дороги, які аналізуються всі виявлені таким чином залежності узагальнюються на графіках дорожніх витрат палива з розмірністю л/100 м (рис. 5).

Така розмірність порівняння зі звичною для інженерів-дорожників одиницею вимірювання

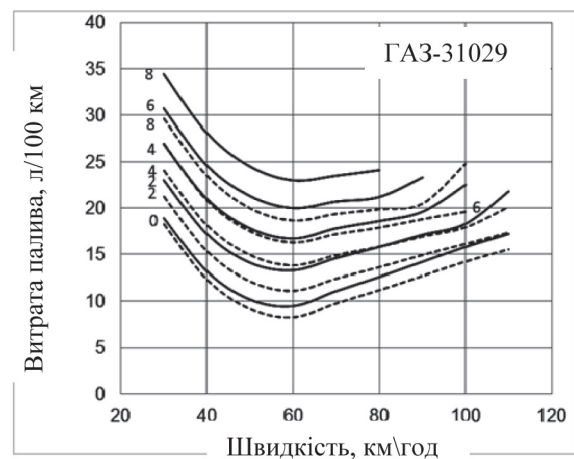
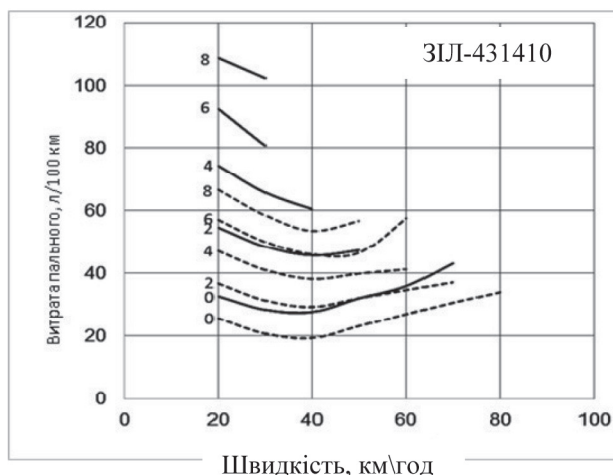


Рис. 3. Витрата палива: суцільна лінія – з вантажем, пунктир – порожній, (показник рівності 50 см/км); асфальтобетон, цифри на кривих – похил підйому, %

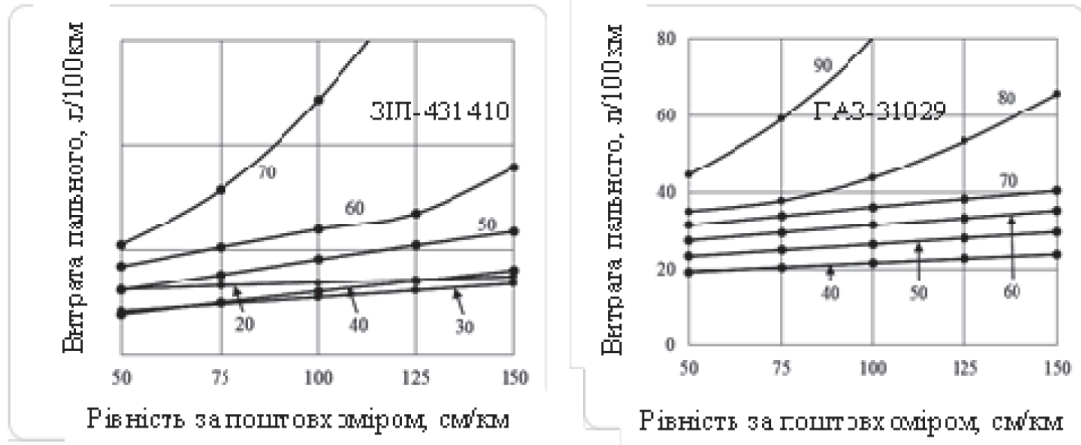


Рис. 4. Залежність витрати палива від рівності дороги (навантажений автомобіль; дорожнє покриття – асфальтобетон; цифри на кривих – швидкість, км/год; похил дороги 0 %)

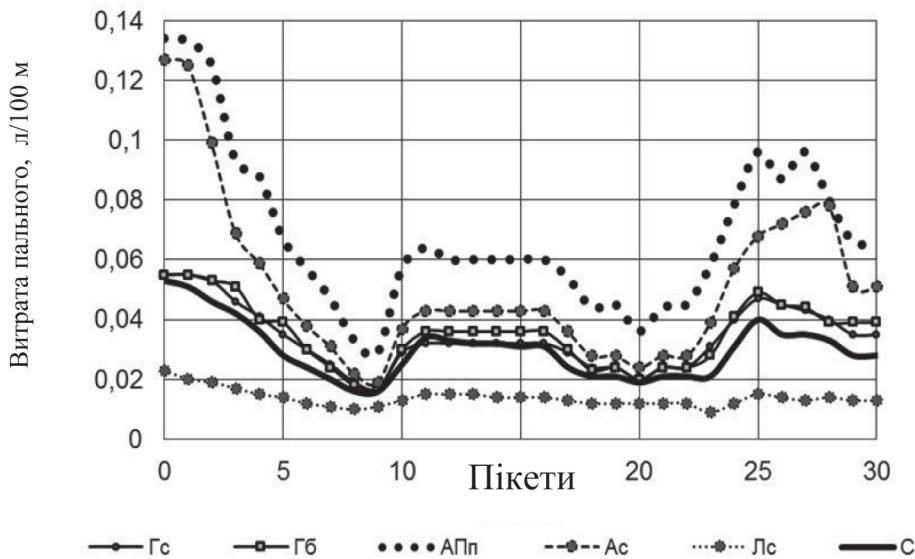


Рис. 5. Витрата палива за типами автомобілів на ділянці дороги

довжини (пикет – 100 м) в проекті дороги. Аналізуючи результати розрахунків на рис. 5 можна провести порівняльну оцінку варіантів проектних рішень і вибрати раціональне рішення щодо будівництва, реконструкції або капітального ремонту дороги. На рис. 5 наведено приклад розрахунків для ділянки дороги, план і поздовжній профіль якої показані на рис. 1, а швидкості руху на рис. 2. Позначення типів автомобілів потоку на рис. 5 прийняті наступні: Гс – вантажні середні, Гб – вантажні великі, АПп – автопоїзди, Ас – автобуси середні, Лс – легкові середні, С – середня витрата палива для даного потоку.

#### Висновки

Наведені результати дослідження закономірностей витрати палива від дорожніх умов показали, що:

- по-перше, точність розрахунків може зробити істотний вплив на транспортні витрати, зокрема, розрахунки витрат палива при перевезеннях в порівнянні з усередненими його значеннями;
- по-друге, в необхідності детальних розрахунків складових транспортних витрат, як уздовж дороги, так і протягом її міжремонтних періодів експлуатації;
- по-третє, в необхідності такого роду розрахунків не для окремого “середнього” автомобіля, а для всіх основних типів автомобілів в розрахунковому складі транспортного потоку на даній дорозі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Литвинов А.С., Фаробин Я.А. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств: Учебник. – М.: Машиностроение, 1989.
2. Агейкин Я.С., Вольская Н.С. Теория автомобиля: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2008. – 318 с.
3. Говорушенко Н.Я., Туренко А.Н. Системотехника проектирования транспортных машин. Учебное пособие. – Харьков, ХНАДУ, 2004. – 208 с.
4. Филиппов В.В., Смирнова Н.В. Моделирование транспортных потоков на дорогах II-IV категорий. – Харьков, ХНАДУ, 2014. – 200 с.
5. Справочная энциклопедия дорожника. Том II. Ремонт и содержание автомобильных дорог / А.П. Васильев (ред.) и др. – М., 2004.