

УДК 656.13.08



І. К. Шаша



А. І. Нікорчук



О. І. Шаповалов

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА РІВЕНЬ БЕЗПЕКИ ДОРОЖНЬОГО РУХУ В УКРАЇНІ

Забезпечення безпеки дорожнього руху є актуальною проблемою, що потребує негайного вирішення у нашій державі. Кількість загиблих у дорожньо-транспортних пригодах в Україні складає приблизно 14 % від загиблих у всій Європі, а кількість автомобілів становить лише 2,2 %.

Важливим питанням забезпечення безпеки дорожнього руху є визначення умов експлуатації транспортних засобів. Основними критеріями у визначенні умов експлуатації є відносний коефіцієнт зміни швидкості автомобіля, прискорення автомобіля та коефіцієнт «шуму прискорення» автомобіля.

К л ю ч о в і с л о в а: умови експлуатації, безпека, дорожній рух, швидкість руху, коефіцієнт, критерій, метод, аварійність, модель, прискорення.

Постановка проблеми. Забезпечення безпеки дорожнього руху є актуальним завданням, яке потребує уваги з боку нашої держави. Це цілком природно, тому що в 2022 році в Україні було скоєно 18 628 дорожньо-транспортних пригод (ДТП), в яких загинуло 2 791 особа та травмовано 23 145 осіб [1]. У 2021 році скоєно 24 521 ДТП, в яких загинуло 3 238 осіб та травмовано 29 738 осіб, що на 24 % більше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із важливих завдань у межах сформульованої проблеми є удосконалення існуючих методик оцінювання рівня безпеки дорожнього руху [2, 3, 4], до яких можна віднести розрахунок коефіцієнта безпеки руху [5].

Обґрунтування введення даного коефіцієнта було визначено з урахуванням аналізу ДТП, який довів, що переважна їх частина відбувається на порівняно коротких ділянках. Враховуючи дорожні умови, безпечний рух на цих ділянках припустимий тільки з обмеженою швидкістю. У той же час дорожні умови на попередніх ділянках не обмежують швидкості руху. Недосвідчений чи необачний водій, який рухається не зважаючи на особливості розташованих попереду ділянок дороги, може розвинути швидкість руху, набагато більшу, ніж допускають дорожні умови. В результаті, у разі необхідності різкого зниження швидкості руху, виникають ускладнення з керуванням автомобілем, і водій ризикує потрапити в аварійну ситуацію.

У таких випадках за критерій безпеки руху було прийняте відношення швидкості руху автомобілів, яка допустима на небезпечній ділянці, до швидкості, що розвивається наприкінці попередньої ділянки, його назвали коефіцієнтом безпеки.

Аналітично коефіцієнт розраховується за формулою

$$K_{\text{без}} = \frac{V}{V_{\text{вх}}}, \quad (1)$$

де $K_{\text{без}}$ – коефіцієнт безпеки руху;

V – середня технічна швидкість автомобіля на ділянці, км/год.;

$V_{\text{вх}}$ – швидкість в'їзду на дану ділянку, км/год.

Дані обстеження великої кількості доріг [6, 7, 8] та додатковий аналіз зв'язку коефіцієнта безпеки з відносною аварійністю показали, що:

– ділянки з відношенням швидкостей поодиноких автомобілів від 1 до 0,8 можна вважати безпечними для руху;

– ділянки з відношенням від 0,8 до 0,7 – порівняно малонебезпечними;

– ділянки з відношенням від 0,6 до 0,7 – небезпечними;

– ділянки з відношенням від 0,6 до 0,1 – дуже небезпечними, на яких регулярно скоюють ДТП.

Метою статті є удосконалення методики визначення впливу умов експлуатації, які оцінюються середньою технічною швидкістю автомобіля, на рівень безпеки дорожнього руху в Україні.

Виклад основного матеріалу. У попередніх дослідженнях у оцінюванні рівня безпеки дорожнього руху було враховано тільки один кінематичний параметр – швидкість руху транспортних засобів. Надати оцінку зміни рівня безпеки дорожнього руху можливо завдяки застосуванню так званого енергетичного підходу.

Спочатку необхідно сформулювати енергетичну модель транспортного потоку. В основу аналітичних виразів необхідно покласти зв'язок енергетичної інтенсивності з масовою щільністю та швидкістю енергетичного потоку:

$$\begin{cases} N_{\Pi} = \frac{m}{2L} V_{\Pi}^3 = q_m V_{\Pi}^3, \\ K_{\text{ПОТ}} = \frac{N_{\Pi} L}{V_{\Pi}}, \end{cases} \quad (2)$$

де N_{Π} – інтенсивність енергетичного потоку, Дж/с;

$K_{\text{ПОТ}}$ – коефіцієнт миттєвої енергетичної характеристики транспортного потоку, Дж;

q_{Π} – щільність енергетичного потоку, Дж/м;

V_{Π} – швидкість енергетичного потоку, м/с;

q_m – масова щільність транспортного потоку, кг/м;

L – довжина ділянки аналізу потоку, де сконцентровані автомобілі сумарною масою m , м.

Система рівнянь є енергетичною моделлю транспортного потоку. Відношення $\frac{m}{2L}$ вказує на те, що

рівняння справедливі для потоку будь-якої щільності на будь-якій ділянці аналізу, за винятком руху поодинокого автомобіля. Така модель адекватно описує формування тяжкості ДТП у транспортному потоці за допомогою миттєвої енергетичної характеристики K_1^n і її змін у просторі K_2^n та часі K_3^n :

$$\begin{cases} K_1^n = N_{\Pi} = \frac{m}{2L} V_{\Pi}^3 = q_m V_{\Pi}^3 \\ \begin{cases} K_2^n = a_n \cdot 3V_{\Pi} \cdot q_m + \frac{dq_m}{dt} V_{\Pi}^2 \\ K_3^n = a_n \cdot 3V_{\Pi}^2 \cdot q_m + \frac{dq_m}{dt} V_{\Pi}^3, \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

де a_n – прискорення енергетичного потоку, м/с².

Зміна характеристики K_1^n прямо пропорційна зміні тяжкості ДТП, що насамперед пов'язано зі зміною кінетичної енергії окремих автомобілів, з їхніми швидкостями руху. Однак ступінь зазначеної зміни визначається відповідною масою, що якісно і кількісно враховує склад потоку.

Між запропонованими характеристиками і кінематичними параметрами руху транспортного потоку виведено математичний зв'язок. Співвідношення між енергетичною та геометричною щільностями потоку має такий вигляд:

$$\begin{aligned} q &= \frac{n}{L} \cdot \frac{m}{m} \cdot \frac{2}{2} = q_m \cdot \frac{2n}{m} = q_m \cdot \frac{2}{m_{\text{ср}}}, \\ q &= q_m \cdot \frac{2}{m_{\text{ср}}}, \end{aligned} \quad (4)$$

де q – геометрична щільність потоку, авт./м;

n – кількість автомобілів на ділянці довжиною L , од.;

$m_{\text{ср}}$ – середня маса автомобілів потоку, кг.

Швидкість транспортного потоку описується таким виразом:

$$V = \frac{K_3^n}{K_2^n} \quad (5)$$

Зв'язок запропонованих характеристик із класичною інтенсивністю руху з урахуванням формули (1) і розробок [9] можна записати у вигляді

$$N = \frac{2}{m_{cp}} \cdot q_m \cdot \frac{K_3^n}{K_2^n}, \quad (6)$$

$$N = \frac{2}{m_{cp}} \cdot \sqrt[3]{q_m \cdot K_1^n}.$$

Залежності (4) – (6) розкривають зв'язок запропонованої системи характеристик аналізу безпеки руху транспортного потоку з основним рівнянням потоку і його кінематичними характеристиками.

Розрахункові формули в рамках зазначених припущень для запропонованих енергетичних характеристик з урахуванням формули (1) мають такий вигляд:

$$K_{1_i}^n = q_m \cdot (V_{sr_i})^3,$$

$$K_{2_i}^n = |3 \cdot q_m \cdot V_{sr_i} \cdot j_i|, \quad (7)$$

$$K_{3_i}^n = |3 \cdot q_m \cdot (V_{sr_i})^2 \cdot j_i|,$$

де V_{sr_i} – значення середньої швидкості транспортного потоку на i -й ділянці дороги, м/с;

j_i – значення середнього прискорення транспортного потоку на i -й ділянці дороги, м/с².

На думку авторів, важливим питанням забезпечення безпеки дорожнього руху є визначення умов експлуатації транспортних засобів. Основними критеріями при визначенні групи умов експлуатації є відносний коефіцієнт зміни швидкості автомобіля, прискорення автомобіля та коефіцієнт «шуму прискорення» автомобіля.

Відносний коефіцієнт зміни швидкості автомобіля визначається за допомогою формули

$$K_v = l_c / (t_p \cdot V_{a_1}) \approx 1,431 \cdot l_c / (t_p \cdot V_{max}), \quad (8)$$

де l_c – пробіг автомобіля за спідометром, км;

t_p – час руху автомобіля, год;

V_{a_1} – швидкість руху даного типу автомобіля на дорозі першої групи, що дорівнює $(0,65 \dots 0,70) \cdot V_{max}$.

Прискорення автомобіля визначається за формулою:

$$\dot{V}_a = \frac{(36 \cdot N_1 \cdot N_{max} \cdot k_k \cdot \eta_{tp} / (G_a \cdot V_a) - \psi - 0,077 kF \cdot V_a^2 / G_a)}{[1 + 0,05(60 / V_a)^2]}, \quad (9)$$

де N_1 – процент використання потужності двигуна;

N_{max} – максимальна потужність двигуна, кВт;

k_k – коефіцієнт кореляції, що враховує зміну потужності двигуна при роботі в реальних умовах експлуатації (0,85 – 0,95);

η_{tp} – ККД трансмісії;

G_a – вага автомобіля, Н;

V_a – швидкість автомобіля, км/год;

ψ – коефіцієнт сумарного дорожнього опору ($\approx 0,8 / V_a$).

Коефіцієнт «шуму прискорення» визначається за допомогою формули

$$K_{\text{ш}} = \left(g \cdot i + kF \cdot V_a^2 / M + \delta \cdot \dot{V}_a \right), \quad (10)$$

де g – прискорення вільного падіння, 9,81 м/с²;

i – ухил дороги, %;

M – маса автомобіля, кг;

δ – коефіцієнт урахування мас автомобіля, що обертаються.

Ураховуючи закон збереження енергії, коефіцієнт безпеки у вигляді виразу (1) об'єктивно не розкриває процес зміни самої безпеки руху, а лише опосередковано її оцінює. Для наповнення зазначеного коефіцієнта об'єктивним змістом у межах аналізу безпеки руху запишемо його значення через енергетичну характеристику (3):

$$K_{\text{бі}}^{\text{э}} = \frac{(K_1^n)_{i+1}}{(K_1^n)_i} = \frac{q_{mi+1} (V_{\text{П}}^3)_{i+1}}{q_{mi} (V_{\text{П}}^3)_i} = K_{qmi} \cdot \left(\frac{V_{\text{П}i+1}}{V_{\text{П}i}} \right), \quad (11)$$

де $K_{\text{бі}}^{\text{э}}$ – i -те значення енергетичного коефіцієнта безпеки;

K_{qmi} – i -те значення коефіцієнта масової щільності потоку.

В умовах зменшення довжини ділянки аналізу куб відношення енергетичних швидкостей потоку дорівнює кубу відомого коефіцієнта безпеки:

$$K_{\text{бі}}^{\text{э}} = K_{qmi} \cdot \left(\frac{V_{\text{П}i+1}}{V_{\text{П}i}} \right)^3 = \left[\begin{matrix} V_{\text{П}} \rightarrow V, \\ L \rightarrow 0 \end{matrix} \right] = K_{qmi} \cdot (K_{\text{бі}})^3, \quad (12)$$

$$K_{\text{бі}}^{\text{э}} = \left(\frac{V_{\text{П}i+1}}{V_{\text{П}i}} \right)^3 = \left[\begin{matrix} q_m = \text{const}, \\ L \rightarrow 0 \end{matrix} \right] = (K_{\text{бі}})^3. \quad (13)$$

Як вже було відзначено, якщо характеристика безпеки дорожнього руху прямо пропорційна аварійності та тяжкості ДТП, то коефіцієнт безпеки, зведений у третій степінь і скоректований залежно від зміни масової щільності потоку, буде також прямо пропорційний зміні зазначених показників.

Додатково можливо виділити зв'язок коефіцієнта безпеки і «шуму прискорення», запропонованого у працях [10, 11]:

$$\sigma_a = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - a_{\text{ср}})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

де n – кількість значень прискорення;

a_i – поточне значення прискорення;

$a_{\text{ср}}$ – середнє арифметичне значення прискорення.

Відношення швидкостей, закладене в коефіцієнті безпеки, з позиції фізики розкриває процес абсолютної зміни швидкості руху. Відносна зміна швидкості руху з урахуванням часу також описує прискорення.

Зв'язок між «шумом прискорення» і коефіцієнтом безпеки в межах геометричної дискретної постановки задачі можна виділити таким чином.

Значення коефіцієнта безпеки для трьох точок швидкості:

$$K_{\text{бі}} = \frac{V_2}{V_1}, \quad K_{\text{бі}} = \frac{V_3}{V_2}. \quad (15)$$

При цьому значення прискорень:

$$a_1 = \frac{V_2 - V_1}{t_1}, \quad a_2 = \frac{V_3 - V_2}{t_2}. \quad (16)$$

Якщо виміри швидкостей виконуватимуться через рівні проміжки часу, можна записати

$$\begin{cases} a_2 = \frac{V_3 - V_2}{V_2 - V_1} = \frac{V_2(K_{62} - 1)}{V_1(K_{61} - 1)} = K_{61} \frac{K_{62} - 1}{K_{61} - 1}. \end{cases} \quad (17)$$

Поточне i -те значення з ряду прискорень за наявності відповідного ряду коефіцієнтів безпеки можна виразити таким чином:

$$\begin{cases} a_i = a_{i-1} \cdot K_{6i-1} \frac{K_{6i} - 1}{K_{6i-1} - 1}, \\ t_i = \text{const}. \end{cases} \quad (18)$$

Загальний член ряду прискорень буде розраховуватися за допомогою такої формули:

$$\begin{cases} a_i = a_1 \cdot \prod_{j=1}^{i-1} \left(K_{6j-1} \frac{K_{6j} - 1}{K_{6j-1} - 1} \right), \\ t_i = \text{const} \end{cases} \quad (19)$$

де a_1 – початкове значення прискорення.

Використовуючи вираз для шуму прискорення та вираз загального члена ряду прискорень, отримаємо

$$\sigma_a = a_1 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left\{ \prod_{j=1}^{i-1} \left(K_{6j-1} \frac{K_{6j} - 1}{K_{6j-1} - 1} \right) \right\}_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \prod_{j=1}^{i-1} \left(K_{6j-1} \frac{K_{6j} - 1}{K_{6j-1} - 1} \right) \right\}_i \right]^2}. \quad (20)$$

Формула розкриває математичний зв'язок між «шумом прискорення» і коефіцієнтом безпеки, об'єднує існуючі теорії та вказує на те, що «шум прискорення» є певною характеристикою безпеки руху разом з існуючими коефіцієнтами безпеки [12].

Висновки

Наведені математичні вирази (3) – (20) формують методику визначення впливу умов експлуатації на рівень безпеки дорожнього руху.

Викладений матеріал свідчить про те, що додаткові характеристики K_2^n , K_3^n не тільки мають зв'язок з коефіцієнтом безпеки та «шумом прискорення», а ще й об'єднують існуючі розробки у цих напрямках та уточнюють їх до рівня об'єктивних критеріїв безпеки руху транспортного потоку.

Отримано новий енергетичний коефіцієнт, що об'єктивно характеризує безпеку руху і додатково враховує склад потоку.

Також отримано математичний зв'язок між коефіцієнтом безпеки руху та «шумом прискорення», який довів об'єктивність характеристик транспортного потоку та їх узагальнюючих властивостей.

Перелік джерел посилання

1. Статистика ДТП в Україні за період з 01.01.2022 по 31.12.2022. URL: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka> (дата звернення: 02.03.2023).
2. Управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах: монографія / Форнальчик Є. Ю., Могила І. А., Трушевський В. Е., Гілевич В. В.; за заг. ред. Є. Ю. Форнальчика. Львів : Львів. політехніка, 2018. 236 с.
3. Абрамова Л. С. Напрямки розвитку сучасного управління дорожнім рухом. *Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту та культури дорожнього руху* : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. м. Харків, 27 берез. 2013. Харків, 2013. С. 58 – 61.
4. Алексієв О. П., Неронов С. М. Інструментальні засоби інформаційно-комунікативної технології моніторингу руху автомобілів. *Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту та культури дорожнього руху* : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 27 берез. 2013. Харків, 2013. С. 212 – 213.
5. Дудников А. Н. Энергетические характеристики системы безопасности движения транспортного потока. *Безпека дорожнього руху України*. Київ : ТОВ «Журнал „Радуга”», 2002. № 3 (14). С. 63 – 67.
6. Нутович А. А., Колесников А. Е., Гогунский В. Д. Модель динамики движения автомобилей через регулируемые перекрестки. *Труды Одесского политехнического университета*. Одесса, 2000. Вып. 2 (11). С. 124 – 127.
7. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ними. URL: <http://surl.li/odtkf> (дата звернення: 30.09.2023).
8. Говорущенко Н. Я., Туренко А. Н. Системотехника транспорта. Харьков : ХГАДТУ, 1998. 468 с.
9. Поліщук В. П., Дудніков О. М. Энергетичні характеристики руху транспортного потоку і коефіцієнт безпеки. *Безпека дорожнього руху України* : наук.-техн. вісник. Київ, 2004. № 3 (14). С. 83 – 88.
10. Шаша І. К., Топчій Р. І. Удосконалення методики розрахунку впливу дорожніх умов на рівень безпеки дорожнього руху в Україні. *Вісник Севастопольського національного технічного університету*. Севастополь, 2011. Вып. 121. С. 30 – 33.
11. Шаша І. К., Гончар Р. О., Темніков В. О. Формування системи оцінювання рівня безпеки дорожнього руху. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2015. Вып. 2 (26). С. 47 – 50.
12. Шаша І. К. Метод оцінки рівня безпеки руху енергетичними характеристиками транспортного потоку. *Безпека на транспорті – основа ефективної інфраструктури: проблеми та перспективи* : зб. тез IV Міжнар. наук.-практ. конф. м. Харків. 26 листоп. Харків, 2019. С. 29 – 31.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2023 р.

UDC 656.13.08

I. Shasha, A. Nikorchuk, O. Shapovalov

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE IMPACT OF OPERATING CONDITIONS ON THE LEVEL OF ROAD SAFETY IN UKRAINE

Ensuring road safety is an urgent problem that requires an immediate solution by our state. The death toll in road accidents in Ukraine is approximately 14 % of those killed throughout Europe, and the number of cars is only 2.2 %.

One of the important tasks within the framework of the formulated problem is the improvement of existing methods for assessing the level of road safety. These methods include the calculation of the traffic safety factor. The justification for the introduction of this coefficient was determined taking into account the analysis of traffic accidents, which proved that most of them are concentrated on relatively short sections. Given the road conditions, safe driving in these areas is permissible only at limited speed.

In previous studies, when setting the problem, only one kinematic parameter was taken into account – the speed of vehicles without the correct replacement of other unaccounted factors. The considered coefficient

can be significantly refined through the use of the so-called energy approach. The analytical expressions should be based on the relationship between energy intensity and mass density and energy flow velocity.

An important issue of ensuring road safety is to determine the operating conditions of vehicles. The main criteria in determining the group of operating conditions are the relative coefficient of change in the speed of the car, the acceleration of the car and the coefficient of "noise acceleration" of the car. A new energy coefficient has been obtained, which objectively characterizes traffic safety and additionally takes into account the composition of the flow.

Also, a mathematical relationship between the traffic safety factor and acceleration noise was obtained, which proved the objectivity of the characteristics of the traffic flow and their generalizing properties.

Keywords: operating conditions, safety, traffic, speed, coefficient, criterion, method, accident, model, acceleration.

Шаша Ігор Костянтинович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України.
<https://orcid.org/0000-0001-7549-3119>

Нікорчук Андрій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України.
<https://orcid.org/0000-0003-2683-9106>

Шаповалов Олександр Ігорович – кандидат технічних наук, доцент, заступник начальника кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України.
<https://orcid.org/0000-0001-8518-4336>