

Бабанін І.В., Дудніков О.М., к.т.н.

АДІ ДВНЗ «ДонНТУ», м. Горлівка

ВПЛИВ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ АВТОМАГІСТРАЛІ НА БЕЗПЕКУ РУХУ

Розглянуто проблему безпеки руху на автомагістралях, що мають чотири смуги руху. Сформульовано загальні підходи до розкриття впливу основних характеристик транспортного потоку на двох смугах одного напрямку ділянки автомагістралі на безпеку руху. Розроблено модель процесу зміни смуги руху з правої на ліву на ділянці автомагістралі з імовірним виникненням побіжного зіткнення.

Постановка наукової проблеми та задачі, що вирішується

На сьогодні спостерігається зростання дорожньо-транспортних подій (ДТП). Найбільша інтенсивність руху фіксується на ділянках доріг I та II технічної категорії, які є автомагістралями. Збільшення інтенсивності руху на ділянках автомагістралей виражається у вигляді її різної зміни за смугами одного напрямку, що повинно впливати на умови руху з боку можливості безпечного виконання водіями маневрів зміни смуги руху та обгону [1]. Маневрування є одним із найважливіших аспектів, пов'язаних із рухом транспортних засобів на багатосмугових дорогах [2].

Дослідження руху транспортних засобів на багатосмугових автомобільних дорогах — одна із найважливіших задач теорії транспортних потоків [2]. Характеристики транспортного потоку на автомагістралях залежать переважно від інтенсивності руху та його складу [3]. Коливання інтенсивності та різномірність у складі транспортного потоку є ключовими чинниками, що впливають на аварійність і, як наслідок, на безпеку руху.

Прийнято вважати, що проблема безпеки руху на автомагістралях вирішується вже на етапі її проектування як дороги вищої категорії (I або II), та не варто підходити до цього питання однозначно. Прослідкуємо ланцюг визначень з [4]: безпека руху характеризується наявною аварійністю, аварійність, у свою чергу, — сукупністю дорожньо-транспортних подій, що складається зі статистики ДТП на автомагістралях, яка наочно демонструє наявну аварійність.

Найпоширенішими у дорожній мережі України є магістралі, що мають по дві смуги руху у кожному напрямку, тому є зрозумілим проявлений до них інтерес. Під час розгляду статистики дорожньо-транспортних подій на цих дорогах необхідно виокремити такий вид ДТП як побіжне зіткнення, що складає значну частку в загальній їх кількості.

Прослідкуємо, що може передувати виникненню побіжного зіткнення. За умов інтенсивного руху і досягнення певного рівня завантаження першої смуги відбувається збільшення щільності потоку та зменшення дистанції між окремими транспортними засобами. Більшість водіїв намагається рухатися з якомога більшими швидкостями, які часто межують із максимально дозволеною. Але наявність у потоці великовантажних транспортних засобів, автобусів, автомобілів, що керуються водіями зі стажем до 2-х років, стримує загальний потік. Різниця швидкостей спонукає водіїв до застосування маневрування, що, за наявності певних супутніх обставин, призводить до імовірності виникнення зіткнень під час зміни смуги руху.

Постає наукова задача щодо з'ясування впливу основних характеристик транспортного потоку на двох смугах одного напрямку ділянки автомагістралі на безпеку руху, рішення якої дозволить розробити практичні заходи щодо попередження водіїв про небезпечність виконання маневрів зміни смуги руху та обгону в умовах наявної інтенсивності, швидкостей та складів руху за смугами.

Мета роботи

Розкриття впливу основних характеристик транспортного потоку на двох смугах одного напрямку ділянки автомагістралі на безпеку руху.

Основна частина

Процеси, що виникають під час руху транспортних засобів на дорогах з багатосмуговою проїзною частиною у кожному напрямку, є складнішими, ніж на дорогах, що мають дві смуги [2]. Процес руху транспортних засобів на магістралі має свої особливості. Кожен окремий транспортний засіб має виняткові динамічні та гальмівні якості. Але, при цьому слід зазначити, що у транспортному потоці кінематика кожного транспортного засобу пов'язана із кінематикою руху інших учасників транспортного потоку.

На режим руху транспортних засобів суттєвий вплив чинить рівень використання смуг проїзної частини. Із поняттям «використання смуг» пов'язують зміну напрямку та розташування траєкторій руху транспортних засобів, обгони та зміни смуг. Характеристики використання необхідні для достовірної оцінки швидкостей і пропускної здатності, правильно-го вибору заходів з організації дорожнього руху [3].

Зі зростанням інтенсивності руху потреба у зміні смуги руху зростає, у той час як можливість її реалізації безперервно зменшується. Це відбувається через скорочення числа інтервалів на суміжних смугах руху, які можуть бути прийнятними для маневрування. Тому водії ризикують і використовують для маневрування незначні інтервали у щільному потоці [2]. Подібний ризик призводить до виникнення імовірності побіжного зіткнення.

Нижче наведено модель виникнення побіжного зіткнення на автомагістралі, що має чотири смуги руху, під час виконання маневру зміни смуги руху із правої на ліву (рис. 1...3).

Вихідними даними є: швидкості транспортних засобів, інтервали руху у просторі, дистанції, склад руху, ширина смуг, стан проїзної частини (повздовжній та поперечний коефіцієнти зчеплення дорожнього покриття).

Розглянемо ділянку автомагістралі з чотирма смугами руху. Рух транспорту здійснюється обома смугами і носить груповий характер. Транспортний потік складається з r транспортних засобів. Для проведення необхідних математичних перетворень виокремимо на кожній смузі по три транспортних засоби, що рухаються у групі один за одним (рис. 1). Припустимо, що правою смугою рухаються транспортні засоби №1, №2 та №3, лівою — транспортні засоби №4, №5 та №6.

Визначальним у наведеній моделі є рух транспортного засобу №2. Розглядаючи його, рух усього транспортного потоку до моменту виникнення побіжного зіткнення можна розділити на чотири етапи:

1 — момент часу перед початком прискорення транспортного засобу №2 з метою зміни смуги руху t_1 (рис. 1);

2 — рух транспортного засобу №2 правою смугою від моменту початку прискорення з метою зміни смуги руху з правої на ліву t_1 до моменту початку виконання маневру t_2 за відрізок часу t_{1-2} (рис. 1);

3 — рух транспортного засобу №2 від моменту початку виконання маневру зміни смуги руху t_2 до моменту його закінчення t_3 за відрізок часу t_{2-3} (рис. 2);

4 — рух транспортного засобу №2 лівою смугою з моменту закінчення виконання маневру зміни смуги руху t_3 до моменту зіткнення транспортних засобів №2 та №5 t_4 за відрізок часу t_{3-4} (рис. 3).

Швидкості транспортних засобів на момент початку прискорення транспортного засобу №2 з метою виконання маневру зміни смуги руху t_1 приймаємо рівними відповідно $v_{1,1}, v_{2,1}, \dots, v_{6,1}, \dots, v_{r,1}$ (рис. 1). Перша цифра індексу відповідає номеру транспортного засобу,

друга — відповідний етап руху. Зазначимо, що рух на лівій смузі відбувається із більшими швидкостями, ніж на правій.

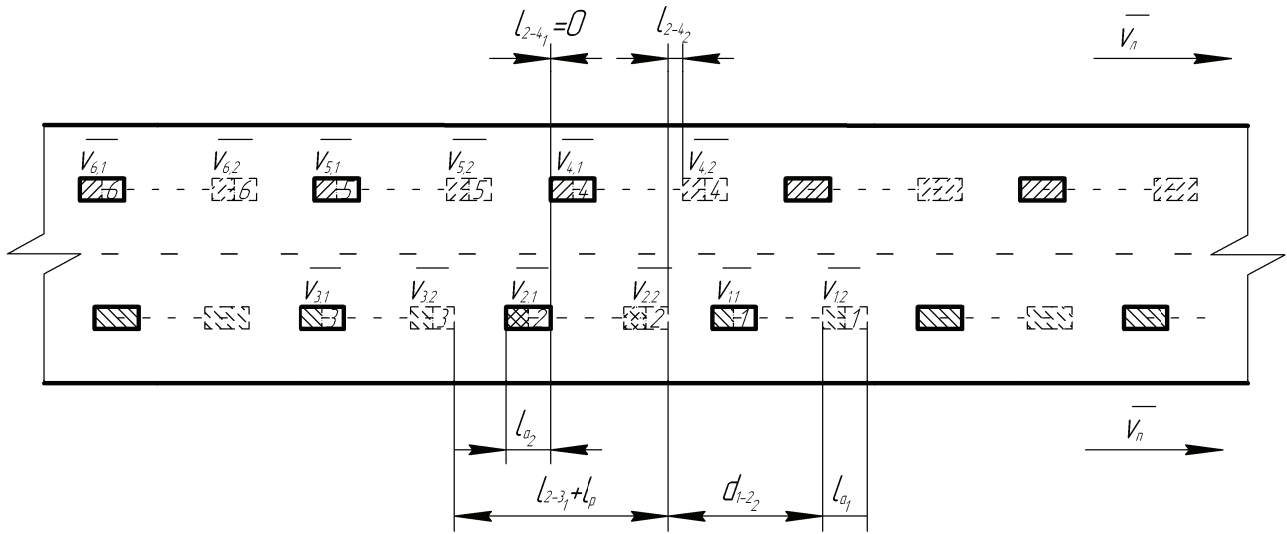


Рис. 1. Схема зміни положень транспортних засобів за час руху транспортного засобу №2 правою смугою від початку прискорення з метою зміни смуги руху до початку виконання маневру t_{1-2} :

- місцезнаходження r -го транспортного засобу на момент початку прискорення транспортного засобу №2 з метою зміни смуги t_1 ;
- місцезнаходження r -го транспортного засобу на момент початку виконання маневру зміни смуги руху транспортним засобом №2 t_2

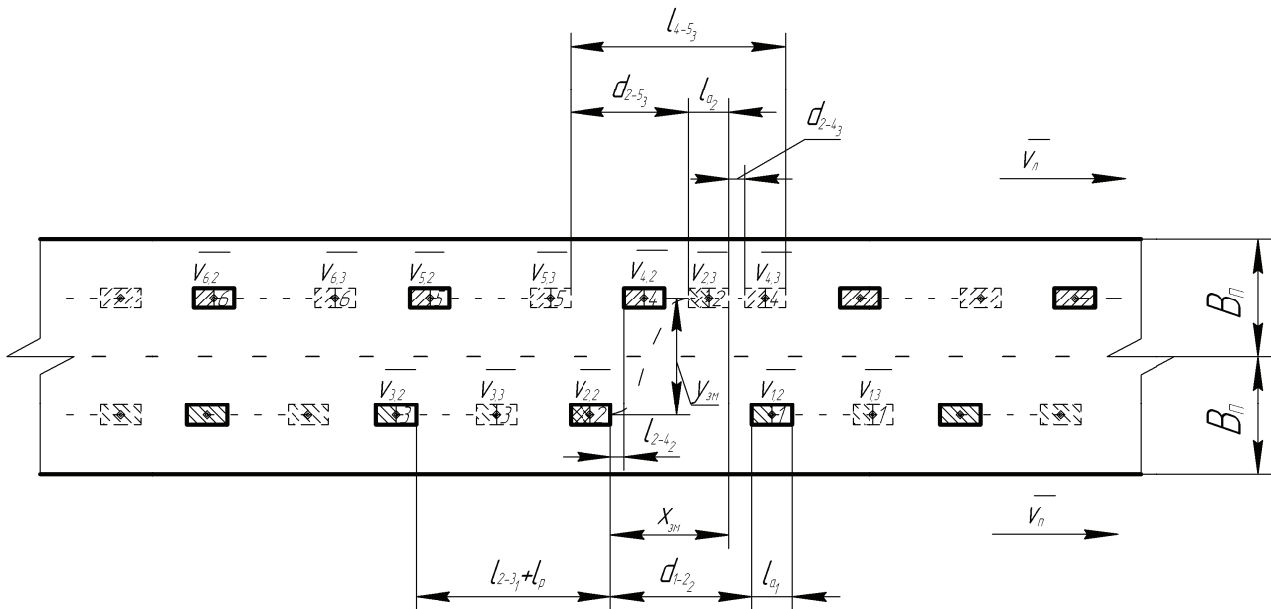


Рис. 2. Схема зміни положень транспортних засобів за час виконання транспортним засобом №2 маневру зміни смуги руху t_{2-3} :

- місцезнаходження r -го транспортного засобу на момент початку виконання маневру зміни смуги руху транспортним засобом №2 t_2 ;
- місцезнаходження r -го транспортного засобу на момент закінчення виконання маневру зміни смуги транспортним засобом №2 t_3

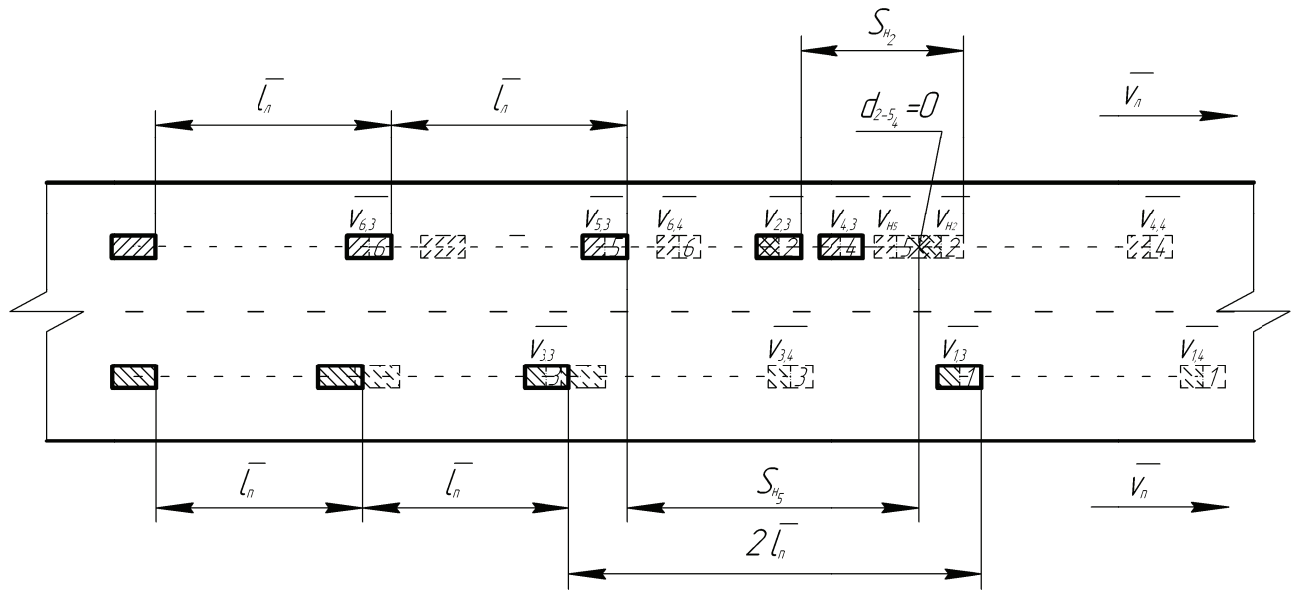


Рис. 3. Схема зміни положень транспортних засобів за час руху транспортного засобу №2 лівою смугою до моменту зіткнення t_{3-4} :

- місцезнаходження r -го транспортного засобу на момент закінчення виконання маневру зміни смуги транспортним засобом №2 t_3 ;
- місцезнаходження r -го транспортного засобу на момент зіткнення транспортних засобів №2 та №5 t_4

Інтервали у просторі між транспортними засобами в групі на момент часу t_1 приймаємо рівними відповідно $l_{1-2}, l_{2-3}, \dots, l_{5-6}, \dots, l_{r-(r-1)}$ (рис. 1). Перші дві цифри індексу вказують на номери транспортних засобів між якими існує певний інтервал у просторі l , друга — на відповідний етап руху.

Дистанції руху між транспортними засобами на момент часу t_1 приймаємо рівними, відповідно, $d_{1-2}, d_{2-3}, \dots, d_{5-6}, \dots, d_{r-(r-1)}$ (рис. 1). Перші дві цифри індексу вказують на номери транспортних засобів, між якими існує дистанція d , друга — на відповідний етап руху.

Довжина r -го транспортного засобу дорівнює значенню l_a .

Щоб зрозуміти за яких характеристик транспортного потоку не уникнути побіжного зіткнення під час виконання маневру зміни смуг руху з правої на ліву, розглянемо цей процес у зворотному напрямку від моменту виникнення дорожньо-транспортної події.

На момент зіткнення відстань між транспортними засобами №2 та №5 d_{2-5} дорівнює нулю.

Від часу виконання маневру і до зіткнення транспортні засоби №2 та №5 встигають проїхати лівою смугою, відповідно S_{n_2} та S_{n_5} , метрів за відповідний проміжок часу t_{3-4} . Дистанція між транспортними засобами №2 та №5 на момент появи транспортного засобу №2 на лівій смузі (рис. 3) становила:

$$d_{2-5} = S_{n_5} - S_{n_2}, \quad (1)$$

де S_{n_2} — шлях, що пройшов транспортний засіб №2 у проміжок часу t_{3-4} , м;

S_{n_5} — шлях, що пройшов транспортний засіб №5 у проміжок часу t_{3-4} , застосувавши екстрене гальмування, м.

Приймаємо, що після зміни смуги руху транспортний засіб №2 опиниться в інтервалі швидкостей $v_{4,3} > v_{2,3} > v_{3,3}$ і продовжуватиме рух до моменту зіткнення з постійним прискоренням.

ренням a_2 . Таким чином, шлях, що пройшов транспортний засіб №2 лівою смугою до зіткнення, складатиме:

$$S_{n_2} = \frac{(v_{n_2})^2 - (v_{2,3})^2}{2a_2}, \quad (2)$$

де v_{n_2} — швидкість руху транспортного засобу №2 на момент зіткнення t_4 , м/с;

$v_{2,3}$ — швидкість руху транспортного засобу №2 у проміжку часу t_{2-3} , м/с;

a_2 — прискорення транспортного засобу №2, м/с²; приймаємо $a_2 = \text{const}$ (у залежності від типу рухомого складу).

Припускаємо, що, побачивши появу попереду транспортного засобу №2, водій транспортного засобу №5 на відріжку S_{n_5} застосував екстрене гальмування з метою уникнення дорожньо-транспортної події. Приймаючи це до уваги, шлях, що пройшов транспортний засіб №5 у проміжок часу t_{3-4} , становить:

$$S_{n_5} = (t_p + t_c + 0,5t_n) \cdot v_{5,3} + \frac{(v_{5,3})^2 - (v_{n_5})^2}{2j_5}, \quad (3)$$

де t_p — час реакції водія транспортного засобу №5, с;

t_c — час спрацювання гальмівної системи транспортного засобу №5, с;

t_n — час наростання сповільнення транспортного засобу №5, с;

$v_{5,3}$ — швидкість руху транспортного засобу №5 на момент часу t_3 , м/с;

v_{n_5} — швидкість руху транспортного засобу №5 на момент часу t_4 , м/с;

j_5 — максимальне сповільнення транспортного засобу №5, м/с²

$$j_5 = \phi_x g, \quad (4)$$

де ϕ_x — поздовжній коефіцієнт зчеплення;

g — прискорення вільного падіння, м/с².

Обов'язковою умовою зіткнення є різниця швидкостей руху транспортних засобів №2 та №5 ($v_{n_5} \geq v_{n_2}$). Очевидно, чим більшою є ця різниця швидкостей, тим раніше відбудеться зіткнення після зміни смуги руху транспортним засобом №2. Для спрощення подальших розрахунків приймаємо мінімально можливе значення швидкості v_{n_5} за умови зіткнення, тобто:

$$v_{n_5} = v_{n_2} = v_n. \quad (5)$$

Враховуючи (2), (3), (4) та (5) запишемо рівняння (1) наступним чином:

$$d_{2,5_3} = (t_p + t_c + 0,5t_n) \cdot v_n + \frac{(v_{5,3})^2 - (v_n)^2}{2\phi_x g} + \frac{(v_n)^2 - (v_{2,3})^2}{2a_2}. \quad (6)$$

На момент часу t_3 дистанція між транспортними засобами №2 та №4 на лівій смузі, як видно з (рис. 2) та з урахуванням (6), складатиме:

$$d_{2,4_3} = l_{4-5_3} - l_{a_2} - d_{2,5_3} = l_{4-5_3} - l_{a_2} - (t_p + t_c + 0,5t_n) \cdot v_{5,3} + \frac{(v_{5,3})^2 - (v_n)^2}{2\phi_x g} + \frac{(v_n)^2 - (v_{2,3})^2}{2a_2}, \quad (7)$$

де l_{4-5_3} — інтервал у просторі між транспортними засобами №4 та №5, що склався на момент часу $t_3, м$;

l_{a_2} — довжина транспортного засобу №2, $м$.

Дистанцію d_{2-4_3} можна також визначити, враховуючи різницю пройденого шляху транспортними засобами №2 та №4 за проміжок часу t_{2-3} :

$$d_{2-4_3} = v_{4,3}t_{2-3} + l_{2-4_2} - x_{зм}, \quad (8)$$

де $v_{4,3}$ — швидкість руху транспортного засобу №4 у проміжку часу $t_{2-3}, м/с$;

t_{2-3} — час виконання маневру зміни смуги руху з правої на ліву транспортним засобом №2, $с$;

l_{2-4_2} — відстань між транспортними засобами №2 та №4 відносно повздовжнього профілю дороги, що склалася на момент часу $t_3, м$;

$x_{зм}$ — повздовжнє зміщення транспортного засобу №2 під час зміни смуги руху у проміжку часу $t_{3-4}, м$.

У формулі (8) невідомими залишаються величини t_{2-3} , l_{2-4_2} та $x_{зм}$.

Враховуючи підвищену небезпеку зміни смуги руху на автомагістралі, вважатимемо, що водій транспортного засобу №2 під час виконання маневру зміни смуги рухатиметься із постійною швидкістю $v_{2,2} = v_{2,3}$ для збереження кращої стійкості та керованості. Враховуючи це, повздовжнє зміщення транспортного засобу №2 $x_{зм}$ можна розрахувати за формулою наведеною у [5]:

$$x_{зм} = 4v_{2,3}t_{2-3}k_m, \quad (9)$$

де k_m — коефіцієнт маневру за [5]

$$k_m = 1,12 + 0,005v_{2,3}. \quad (10)$$

У формулі (9) невідомими є t_{2-3} та $v_{2,3}$.

Поперечне зміщення транспортного засобу №2 при зміні смуги руху $y_{зм}$ у проміжку часу t_{3-4} виразимо з [5]:

$$y_{зм} = \frac{g \phi_y x_{зм}^2}{8(v_{2,3})^2}, \quad (11)$$

де ϕ_y — поперечний коефіцієнт зчеплення.

Приймаємо, що смуги руху на магістралі мають однакову ширину B_n метрів. Під час розрахунків вважатимемо, що транспортний засіб №2 виконує маневр перешикування з середини правої на середину лівої смуги, тому запишемо

$$y_{зм} = B_n. \quad (12)$$

З урахуванням (11) та (12) отримуємо ще одну залежність для визначення $x_{зм}$:

$$x_{зм} = v_{2,3} \left(\frac{8B_n}{g \phi_y} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

Виразимо значення часу $t_{2,3}$ з (9) з урахуванням (13):

$$t_{2,3} = \frac{x_{3M}}{v_{2,3}} = \frac{1}{4v_{2,3}k_M} v_{2,3} \left(\frac{8B_n}{g\phi_y} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{B_n}{2k_M^2 g \phi_y} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

Відстань $l_{2,4_2}$ виразимо з (8):

$$l_{2-4_2} = d_{2-4_3} - v_{4,3}t_{2-3} + x_{3M} = l_{4-5_3} - l_{a_2} - (t_p + t_c + 0,5t_n) \cdot v_{5,3} + \frac{(v_{5,3})^2 - (v_n)^2}{2\phi_x g} + \frac{(v_n)^2 - (v_{2,3})^2}{2a_2} - v_{4,3} \left(\frac{B_n}{2k_M^2 g \phi_y} \right)^{\frac{1}{2}} + v_{2,3} \left(\frac{8B_n}{g\phi_y} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

Допускаємо, що водій транспортного засобу №2, який прийняв рішення змінити смугу руху, починає прискорення, коли відстань між транспортними засобами №2 та №4 відносно повздовжнього профілю дороги $l_{2,4_1}$ дорівнюватиме нулю. З цього моменту водій транспортного засобу №2 продовжує рух із прискоренням a_2 до моменту початку зміни смуги руху. Таким чином вимальовується остаточна «картина» зміни швидкості руху транспортного засобу №2 за відрізок часу t_{1-4} , що складається з t_{1-2} , t_{2-3} та t_{3-4} (рис. 4).

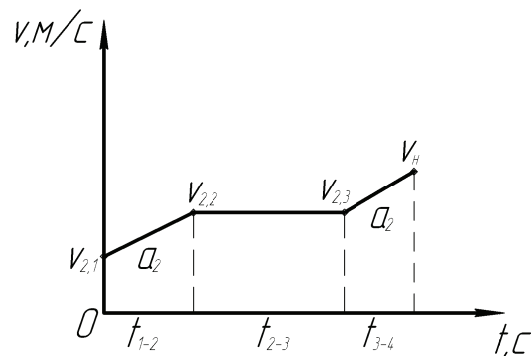


Рис. 4. Графік зміни швидкості руху транспортного засобу №2 за час t_{1-4} .

Враховуючи це, відстань відносно повздовжнього профілю дороги між транспортними засобами №2 та №4 $l_{2,4_2}$ виразимо через різницю відрізків, що пройшли ці транспортні засоби за час t_{1-2} :

$$l_{2,4_2} = v_{4,2}t_{1-2} - \frac{(v_{2,2})^2 - (v_{2,1})^2}{2a_2}, \quad (16)$$

де $v_{4,2}$ — швидкість руху транспортного засобу №4 у проміжку часу t_{1-2} , м/с;

$v_{2,2}$ — швидкість руху транспортного засобу №2 на момент часу t_2 , м/с;

$v_{2,1}$ — швидкість руху транспортного засобу №2 на момент часу t_1 , м/с.

Проаналізувавши рух транспортних засобів №1 та №2 бачимо, що приріст відстані l_p , яку пройшов транспортний засіб №2 у проміжку часу t_{1-2} рухаючись із постійним прискоренням a , дорівнює різниці у відстанях, що пройшли транспортні засоби №1 та №2 за цей проміжок часу:

$$l_p = \frac{(v_{2,2})^2 - (v_{2,1})^2}{2a_2} - v_{3,1}t_{1-2}, \quad (17)$$

де $v_{3,1}$ — швидкість руху транспортного засобу №3 у проміжку часу t_{1-2} , м/с;

t_{1-2} — час руху транспортного засобу №2 правою смугою від моменту початку прискорення з метою зміни смуги руху до моменту виконання маневру, с.

Згідно (рис. 1) відстань l_p можна записати, як:

$$l_p = l_{2-3_1} - l_{a_1} - d_{1-2}, \quad (18)$$

де l_{2-3_1} — інтервал у просторі між транспортними засобами №2 та №3, що існував на момент початку розгляду ситуації, м;

l_{a_1} — довжина транспортного засобу №1, м;

d_{1-2} — дистанція між транспортними засобами №1 та №2, що склалася на момент початку зміни смуги руху, м.

Дистанцію, що у момент часу t_2 склалася між транспортними засобами №1 та №2 d_{1-2} знайдемо з умови, що вирівнювання швидкостей транспортного засобу, що здійснює обгін, та транспортного засобу, якого обганяють, відбувається на відстані d , яку можна визначити за формулою з [6]:

$$d_{1-2} = 6,5e^{0,09v_{cs}}, \quad (19)$$

де v_{cs} — швидкість вільного руху, м/с; приймаємо $v_{cs} = v_{2,2}$.

Виходячи з (17), (18) та (19) отримуємо значення часу руху транспортного засобу №2 правою смугою від початку прискорення з метою зміни смуги руху до початку виконання маневру t_{1-2} :

$$\begin{aligned} t_{1-2} &= \frac{1}{v_{3,1}} \left(\frac{(v_{2,2})^2 - (v_{2,1})^2}{2a_2} - l_p \right) = \frac{1}{v_{3,1}} \left(\frac{(v_{2,2})^2 - (v_{2,1})^2}{2a_2} - l_{2-3_1} - l_{a_1} - d_{1-2} \right) = \\ &= \frac{1}{v_{3,1}} \left(\frac{(v_{2,2})^2 - (v_{2,1})^2}{2a_2} - l_{2-3_1} - l_{a_1} - 6,5e^{0,09 \cdot v_{2,2}} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Враховуючи (20) формула (16) матиме наступний вигляд:

$$l_{2-4_2} = \frac{v_{4,2}}{v_{3,1}} \left(\frac{(v_{2,2})^2 - (v_{2,1})^2}{2a_2} - l_{2-3_1} - l_{a_1} - 6,5e^{0,09 \cdot v_{2,2}} \right) - \frac{(v_{2,2})^2 - (v_{2,1})^2}{2a_2}. \quad (21)$$

Підставив (21) до залежності (15) отримаємо:

$$\begin{aligned} &\frac{v_{4,2}}{v_{3,1}} \left(\frac{(v_{2,2})^2 - (v_{2,1})^2}{2a_2} - l_{2-3_1} - l_{a_1} - 6,5e^{0,09 \cdot v_{2,2}} \right) - \frac{(v_{2,2})^2 - (v_{2,1})^2}{2a_2} = l_{4-5_3} - l_{a_2} - \\ &- (t_p + t_c + 0,5t_n) \cdot v_{5,3} + \frac{(v_{5,3})^2 - (v_n)^2}{2\phi_x g} + \frac{(v_n)^2 - (v_{2,3})^2}{2a_2} - v_{4,3} \left(\frac{B_n}{2k_m^2 g \phi_y} \right)^{\frac{1}{2}} + v_{2,3} \left(\frac{8B_n}{g \phi_y} \right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (22)$$

Швидкість транспортного засобу №2 на момент закінчення маневру зміни смуги руху t_3 знайдемо як різницю швидкості у момент зіткнення транспортних засобів №2 та №5 з її нарощенням за час руху транспортного засобу №2 лівою смугою магістралі до моменту зіткнення t_4 :

$$v_{2,3} = v_{2,2} = v_n - a_2 \cdot t_{3-4}, \quad (23)$$

де t_{3-4} — час руху транспортного засобу №2 лівою смугою до моменту зіткнення, с.

Описуючи процес екстреного гальмування транспортного засобу №5 під час появи на лівій смузі транспортного засобу №2, отримуємо значення часу t_{3-4} :

$$t_{3-4} = t_p + t_c + 0,5t_n + \frac{v_{5,3} - v_n}{2\phi_x g}. \quad (24)$$

Враховуючи (24) формула (23) матиме вигляд:

$$v_{2,3} = v_{2,2} = v_n - a_2 \left(t_p + t_c + 0,5t_n + \frac{v_{5,3} - v_n}{2\phi_x g} \right). \quad (25)$$

З урахуванням (25) залежність (22) набуде наступного вигляду;

$$\begin{aligned} & \frac{v_{4,2}}{v_{3,1}} \left(\frac{\left[v_n - a_2 \left(t_p + t_c + 0,5t_n + \frac{v_{5,3} - v_n}{2\phi_x g} \right) \right]^2 - (v_{2,1})^2}{2a_2} - l_{2-3_1} - l_{a_1} - 6,5e^{0,09 \left[v_n - a_2 \left(t_p + t_c + 0,5t_n + \frac{v_{5,3} - v_n}{2\phi_x g} \right) \right]} \right) - \\ & - \frac{\left[v_n - a_2 \left(t_p + t_c + 0,5t_n + \frac{v_{5,3} - v_n}{2\phi_x g} \right) \right]^2 - (v_{2,1})^2}{2a_2} = l_{4-5_3} - l_{a_2} - (t_p + t_c + 0,5t_n) \cdot v_{5,3} + \\ & + \frac{(v_{5,3})^2 - (v_n)^2}{2\phi_x g} + \frac{(v_n)^2 - \left[v_n - a_2 \left(t_p + t_c + 0,5t_n + \frac{v_{5,3} - v_n}{2\phi_x g} \right) \right]^2}{2a_2} - v_{4,3} \left(\frac{B_n}{2k_m^2 g \phi_y} \right)^{\frac{1}{2}} + \\ & + \left[v_n - a_2 \left(t_p + t_c + 0,5t_n + \frac{v_{5,3} - v_n}{2\phi_x g} \right) \right] \cdot \left(\frac{8B_n}{g \phi_y} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (26) \end{aligned}$$

Для спрощення моделі введемо наступні припущення:

– швидкості руху окремо узятих транспортних засобів прирівнюється до середньої швидкості руху на смузі і складають відповідно \bar{v}_n та \bar{v}_l для правої та лівої смуги;

– інтервали у просторі між сусідніми транспортними засобами приймаються рівними відповідними \bar{l}_n для правої смуги та \bar{l}_l — для лівої;

– габаритні довжини транспортних засобів приймаємо усередненими, \bar{l}_{a_n} і \bar{l}_{a_l} для правої та лівої смуг відповідно;

– транспортний засіб, що змінює смугу руху перед та після виконання маневру, рухається з постійним прискоренням \bar{a} , m/c^2 ;

- сумарний час реакції водія, час спрацьовування гальмівної системи та половини часу наростання сповільнення усереднюємо до \bar{t} ;
- коефіцієнт маневру для автомагістралі приймаємо рівним $k_m = 1,13$ (при $v_a = 20$ м/с).

У підсумковій залежності дані припущення матимуть вигляд $v_{4,2} = \bar{v}_l$; $v_{3,1} = \bar{v}_n$; $a_2 = \bar{a}$; $v_{5,3} = \bar{v}_l$; $v_{2,1} = \bar{v}_n$; $l_{a_1} = \bar{l}_{a_n}$; $l_{4,5,3} = \bar{l}_l$; $l_{2,3,1} = \bar{l}_n$; $l_{a_2} = \bar{l}_{a_n}$; $v_{4,3} = \bar{v}_l$; $k_m = 1,13$; $t_p + t_c + t_H = \bar{t}$.

Підсумкове рівняння зв'язку між інтервалами руху у просторі на правій \bar{l}_n та лівій \bar{l}_l смугах за заданою швидкістю v_n для виникнення побіжного зіткнення при зміні смуги руху з правої на ліву має вигляд

$$\begin{aligned} & \frac{\bar{v}_l}{\bar{v}_n} \left(\frac{\left[v_n - \bar{a} \left(\bar{t} + \frac{\bar{v}_l - v_n}{2\phi_x g} \right) \right]^2 - (\bar{v}_n)^2}{2\bar{a}} - \bar{l}_n - \bar{l}_{a_n} - 6,5e^{0,09 \left[v_n - \bar{a} \left(\bar{t} + \frac{\bar{v}_l - v_n}{2\phi_x g} \right) \right]} \right) - \\ & - \frac{\left[v_n - \bar{a} \left(\bar{t} + \frac{\bar{v}_l - v_n}{2\phi_x g} \right) \right]^2 - (\bar{v}_n)^2}{2\bar{a}} = \bar{l}_l - \bar{l}_{a_n} - \bar{t} \bar{v}_l + \frac{(\bar{v}_l)^2 - (v_n)^2}{2\phi_x g} + \\ & + \frac{(v_n)^2 - \left[v_n - \bar{a} \left(\bar{t} + \frac{\bar{v}_l - v_n}{2\phi_x g} \right) \right]^2}{2\bar{a}} - \bar{v}_l \left(\frac{B_n}{2,55g\phi_y} \right)^{\frac{1}{2}} + \left[v_n - \bar{a} \left(\bar{t} + \frac{\bar{v}_l - v_n}{2\phi_x g} \right) \right] \cdot \left(\frac{8B_n}{g\phi_y} \right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (27)$$

Враховуючи основне рівняння транспортного потоку $\bar{N} = \bar{q}\bar{v} = \frac{1}{l}\bar{v}$ і провівши деякі математичні перетворення отримаємо з (26) наступну залежність:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\bar{N}_n} + \frac{1}{\bar{N}_l} = \frac{1}{\bar{v}_n} \left(\frac{\left[v_n - \bar{a} \left(\bar{t} + \frac{\bar{v}_l - v_n}{2\phi_x g} \right) \right]^2 - (\bar{v}_n)^2}{2\bar{a}} - \bar{l}_{a_n} - 6,5e^{0,09 \left[v_n - \bar{a} \left(\bar{t} + \frac{\bar{v}_l - v_n}{2\phi_x g} \right) \right]} \right) - \\ & - \frac{\left[v_n - \bar{a} \left(\bar{t} + \frac{\bar{v}_l - v_n}{2\phi_x g} \right) \right]^2 - (\bar{v}_n)^2}{2\bar{a}\bar{v}_l} + \frac{\bar{l}_{a_n}}{\bar{v}_l} + \bar{t} - \frac{(\bar{v}_l)^2 - (v_n)^2}{2\phi_x g \bar{v}_l} + \frac{(v_n)^2 - \left[v_n - \bar{a} \left(\bar{t} + \frac{\bar{v}_l - v_n}{2\phi_x g} \right) \right]^2}{2\bar{a}\bar{v}_l} + \\ & + \left(\frac{B_n}{2,55g\phi_y} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{\bar{v}_l} \left[v_n - \bar{a} \left(\bar{t} + \frac{\bar{v}_l - v_n}{2\phi_x g} \right) \right] \cdot \left(\frac{8B_n}{g\phi_y} \right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (28)$$

Формалізація моделі дозволила отримати залежність щодо співвідношення інтенсивності за смугами. У моделі враховано геометричні та кінематичні характеристики руху транспортних засобів. У остаточній формулі (28) присутні характеристики, що пов'язані з водієм (сумарний час реакції водія, час спрацьовування гальмівної системи та половина часу наростання сповільнення), транспортним потоком (середні швидкості транспортного потоку за смугами, інтервали руху у просторі, середня довжина транспортних засобів на правій смузі,

прискорення транспортного засобу, що здійснює маневр) та дорожніми умовами (повздовжній та поперечний коефіцієнти зчеплення, ширина смуги руху).

Висновок

Сформульовано загальні підходи до розкриття впливу основних характеристик транспортного потоку на безпеку руху на ділянках автомагістралі, які дозволили виявити вплив інтенсивності та складу транспортного потоку на умови виникнення дорожньо-транспортних подій з урахуванням швидкості зіткнень транспортних засобів, яка визначає тяжкість ДТП.

Отримані результати дозволяють надалі проводити дослідження щодо розробки заходів зменшення кількості дорожньо-транспортних подій, впливаючи на виявлені умови її виникнення та зменшення тяжкості ДТП у межах швидкості зіткнення транспортних засобів.

Список літератури

1. Справочник по безопасности дорожного движения, обзор мероприятий по безопасности дорожного движения / под ред. В.В. Сильянова. — Осло-Москва-Хельсинки, 2001. — 576 с.
2. Красников А.Н. Закономерности движения на многополосных автомобильных дорогах / А.Н. Красников. — М.: Транспорт, 1988. — 111 с.
3. Шевяков А.П. Организация движения на автомобильных магистралях / А.П. Шевяков. — М.: Транспорт, 1985. — 96 с.
4. ДСТУ 2935-94. Безпека дорожнього руху. Терміни та визначення.
5. Иларионов В.А. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий / В. А. Иларионов. — М.: Транспорт, 1989. — 255 с.
6. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В.В. Сильянов. — М.: Транспорт, 1977. — 303 с.

Стаття надійшла до редакції 31.03.09

© Бабанін І.В., Дудніков О.М., 2009