

УДК 656.13.05

Дудніков О.М., канд. техн. наук

### ОСНОВНІ РІВНЯННЯ БАГАТОРЯДНОГО ЩІЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ ЗА ХАРАКТЕРНИМИ ДОРОЖНЬО- ТРАНСПОРТНИМИ СИТУАЦІЯМИ

**Анотація.** У статті синтезовані основні рівняння багаторядного щільного транспортного потоку за характерними дорожньо-транспортними ситуаціями з урахуванням виконання умови адекватного сприйняття відносного між собою руху рядів з можливістю виконання екстреного гальмування для порівняння швидкостей відповідних транспортних засобів з сусідніх рядів руху. Розроблені основні рівняння забезпечують можливість їх подальшого розвитку до рівнянь забезпечення безпеки руху багаторядних щільних транспортних потоків.

**Ключові слова:** безпеки руху, дорожньо-транспортна ситуація.

**Аннотация.** В статье синтезированные основные уравнения многорядного плотного транспортного потока для характерных дорожно-транспортных ситуаций с учетом выполнения условия адекватного восприятия относительного между собой движения рядов с возможностью выполнения экстренного торможения для выравнивания скоростей соответствующих транспортных средств из соседних рядов движения. Разработанные основные уравнения обеспечивают возможность их дальнейшего развития в уравнения обеспечения безопасности движения многорядных плотных транспортных потоков.

**Ключевые слова:** безопасности движения, дорожно-транспортная ситуация.

**Annotation.** In article the synthesized main equations there is a lot of ryadny dense transport stream for characteristic road and transport situations taking into account performance of a condition of adequate perception relative among themselves movement of ranks with possibility of performance of emergency braking for alignment of speeds of the corresponding vehicles from the next ranks of movement. The developed main equations provide possibility of their further development in the equations of safety of movement many ryadny dense transport streams.

Сьогодні автомобільний транспорт визнаний як найбільш небезпечний з усіх інших видів транспорту. Згідно даних статистики країн Європейського союзу (ЄС) переміщення людини за допомогою автомобіля в десять разів небезпечніше ніж в літаку та в двадцять разів небезпечніше ніж в вагоні потягу. За один рік в країнах ЄС спостерігається близько 1 млн. 300 тис. дорожньо-транспортних пригод (ДТП), в яких гине понад 45 тис. осіб та травмується біля 1 млн. 700 тис. осіб [1,2]. Вказані цифри розкривають значну актуальність розгляду проблеми безпеки дорожнього руху.

В Україні в період останніх десяти років щорічно спостерігається коливання загальної кількості ДТП в межах 27...38 тис., в яких гине біля 4...6 тис. осіб та отримує поранення – 30...45 тис. осіб. Відносна кількість ДТП порівняно з країнами ЄС в Україні в 4...10 разів більша. Кількість загиблих у ДТП складає 8...13% від загиблих у ДТП всієї Європи, тоді як кількість автомобілів – лише 2% від всього європейського автомобільного парку [1,2]. В таких умовах актуальність проблеми безпеки дорожнього руху в Україні є найбільш суттєвою серед країн ЄС.

Існуючі методи та стандартизовані заходи забезпечення безпеки руху на ділянках доріг, що застосовуються у світі та в Україні, за розглянутими наявними на теперішній час показниками аварійності не дозволяють вирішити практичну проблему підвищення безпеки руху на автомагістралях шляхом розробки заходів зі зниження кількості та тяжкості ДТП. В свою чергу, зазначене розкриває наявність наукової проблеми щодо розробки теоретичних основ та практичних методів забезпечення безпеки руху на автомагістралях.

У роботі [3] було запропоноване основне рівняння багаторядного щільного транспортного потоку, який спостерігається певний час на відповідній довжині ділянки дороги:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{L}{\Delta t} \left[ \left( q_{L1} \pm \frac{n_{p1-2}}{L} \right) \cdot \bar{V}_{L1} - q_{L01} \cdot \bar{V}_{L01} \right] = N_{1,1} \cdot \bar{V}_{1,1} - N_{2,1} \cdot \bar{V}_{2,1} + \bar{a}_{L1}, \\
 \frac{L}{\Delta t} \left[ \left( q_{L2} \pm \frac{n_{p1-2}}{L} \pm \frac{n_{p2-3}}{L} \right) \cdot \bar{V}_{L2} - q_{L02} \cdot \bar{V}_{L02} \right] = N_{1,2} \cdot \bar{V}_{1,2} - N_{2,2} \cdot \bar{V}_{2,2} + \bar{a}_{L2}, \\
 \dots \\
 \frac{L}{\Delta t} \left[ \left( q_{Lm} \pm \frac{n_{pm}}{L} \right) \cdot \bar{V}_{Lm} - q_{L0m} \cdot \bar{V}_{L0m} \right] = N_{1,m} \cdot \bar{V}_{1,m} - N_{2,m} \cdot \bar{V}_{2,m} + \bar{a}_{Lm}, \\
 \sum_{r=1}^m N_{1,r} = N_{1\Sigma}, \quad \frac{1}{m} \sum_{r=1}^m \bar{V}_{1,r} = \bar{V}_{1\Sigma}, \\
 \sum_{r=1}^m N_{2,r} = N_{2\Sigma}, \quad \frac{1}{m} \sum_{r=1}^m \bar{V}_{2,r} = \bar{V}_{2\Sigma}, \\
 q_{L0r} \geq \frac{1}{6,5 \cdot e^{0,009 \cdot \bar{V}_{CB}}}, \\
 \bar{V}_{Lr} = \frac{\bar{V}_{L0r}}{\left( \frac{q_{Lr}}{a} \right)^3 + 1} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{q_{Lr}}{q_{\max}} \cdot m \right)^2}.
 \end{array} \right. \quad (1)$$

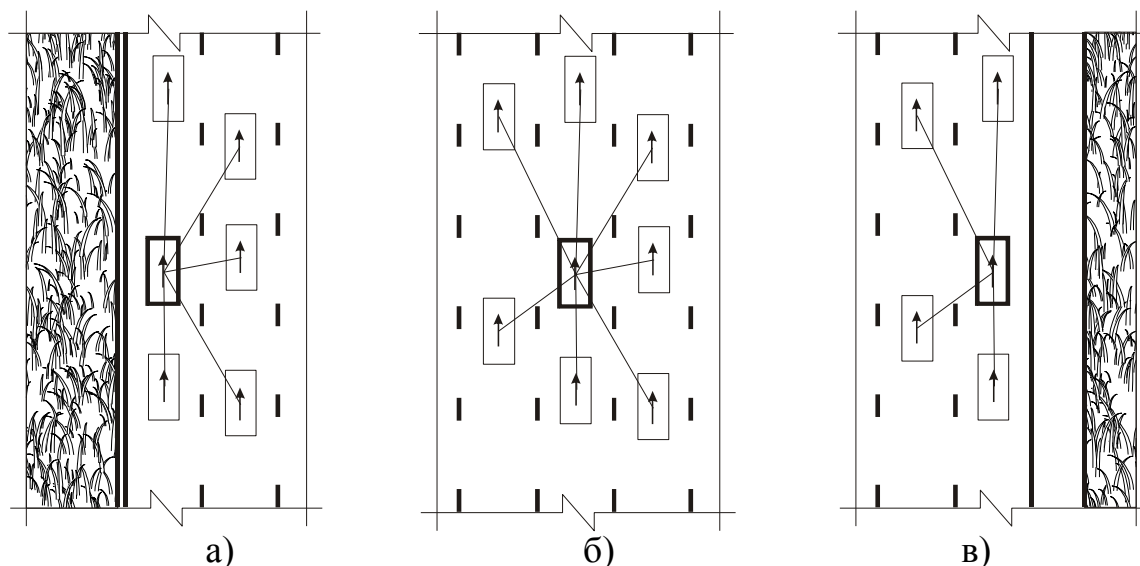
де  $L$  - довжина ділянки дороги, де досліджуються зміни характеристик однорядного транспортного потоку;  $\Delta t$  - приріст часу дослідження змін характеристик однорядного транспортного потоку;  $q_{0L}$ ,  $q_L$  - миттєві усереднені значення щільності однорядного транспортного потоку на довжині ділянки дороги  $L$ , які були розраховані на початку відрахування часу спостереження  $\Delta t$  та після його відрахування;  $\bar{V}_{L0}$ ,  $\bar{V}_L$  - миттєві швидкості однорядного транспортного потоку за довжиною досліджуваної ділянки дороги  $L$ , які були розраховані на початку відрахування часу спостереження  $\Delta t$  та після його відрахування;  $N_1$ ,  $N_2$  - усереднені значення інтенсивності руху транспортного потоку в перетинах 1 та 2 на границях ділянки дороги, які отримані за приріст часу спостереження  $\Delta t$ ;  $\bar{V}_1$  - швидкість транспортного

потоку у перетині 1 ділянки дороги за час спостереження  $t = \Delta t$ ;  $\bar{V}_2$  - швидкість транспортного потоку у перетині 2 ділянки дороги за час спостереження  $t = \Delta t$ ;  $\bar{a}_L$  - прискорення однорядного транспортного потоку на довжині досліджуваної ділянки дороги за час  $t = \Delta t$ ;  $n_{p_m}$  - кількість транспортних засобів, що маневрують зміною відповідних сусідніх смуг руху, потрапляють або виходять зі складу однорядного транспортного потоку на досліджуваній ділянці дороги за час спостереження  $\Delta t$ ;  $N_{1\Sigma}$ ,  $N_{2\Sigma}$  - усереднені значення сумарних інтенсивностей руху багаторядного транспортного потоку у перетинах 1 та 2 на межі досліджуваної ділянки дороги, які отримані за час спостереження  $\Delta t$  за всіма смугами руху  $m$ ;  $\bar{V}_{1\Sigma}$ ,  $\bar{V}_{2\Sigma}$  - швидкості багаторядного транспортного потоку у перетинах 1 та 2 на межі досліджуваної ділянки дороги, які отримані усередненням швидкостей поодиноких транспортних потоків за часом спостереження  $\Delta t$  за всіма смугами руху  $m$ ;  $q_{\max}$  - максимальна щільність транспортного потоку на окремій смузі руху, авт./км;  $a$  - константа, що приймає наступні значення [4]: для чотирьох смугових доріг  $a = 90$  од., а для шістьох смугових  $a = 135$  од.

В синтезованому понятті безпеки руху багаторядного транспортного потоку передбачається виникнення конфлікту в межах дорожньо-транспортної ситуації, що склалася на певній довжині дороги або в межах території сприйняття багаторядного руху відповідним водієм, де виникає помилка учасника руху та створюється правова конфліктна ситуація, тому необхідно з застосуванням мікроскопічного підходу проаналізувати вказане явище на предмет можливості синтезу теоретичних основ для забезпечення вимог поняття безпеки руху.

Сприйняття дорожньо-транспортної ситуації передбачає послідовну оцінку взаємодії кожного окремого учасника дорожнього руху з іншими, що знаходяться в межах вказаної дорожньо-транспортної ситуації на ділянці дороги.

В умовах руху багаторядних транспортних потоків на ділянці дороги визначеної довжини відносно окремого учасника дорожнього руху складаються певні типові випадки сумісної взаємодії на мікроскопічному рівні аналізу, що вказані на рис. 1.



**Рисунок 1** – Випадки сумісної взаємодії окремого транспортного засобу з іншими в умовах дорожньо-транспортної ситуації на ділянці дороги в умовах руху багаторядних щільних транспортних потоків.

З урахуванням особливостей сприйняття водієм наявної навколишньої дорожньо-транспортної ситуації на відповідній смузі руху головну увагу серед транспортних засобів своєї смуги руху водій приділяє двом транспортним засобам, одному, що рухається попереду та другому, що рухається позаду, шляхом контролю відповідних дистанцій.

Інші транспортні засоби, які рухаються по сусіднім смугам, водій сприймає на відстанях, що відповідають вказаним дистанціям та звертає на них особливу увагу при підготовці маневру зміни смуги свого руху.

З застосуванням (1) можливо записати системи рівнянь, що описують стани для однорядних транспортних потоків за схемами рис. 1, з урахуванням того, що для смуги, де рухає досліджуваний транспортний засіб необхідна наявність трьох автомобілів, звідки знаходимо необхідну довжину досліджуваної ділянки дороги та відповідні межі дорожньо-транспортної ситуації, яка моделюється, за відповідними сусідніми рядами руху. Надалі, запишемо умови формування дорожньо-транспортних ситуацій за синтезованими раніш трьома випадками розташування транспортного засобу відповідного ряду руху на ділянці дороги визначеної довжини. Довжина ділянки дороги не повинна бути меншою за відстань, де рухають передній та задній транспортні засоби відносно транспортного засобу, за яким формується аналіз дорожньо-транспортної ситуації.

Для випадку дорожньо-транспортної ситуації рис. 1 а) можливо записати:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 n_{L_m} \pm n_{p_m} = 3, \\
 n_{L(m-1)} \pm n_{p_{m-(m-1)}} \pm n_{p_{(m-1)-(m-2)}} = \frac{\Delta t}{\bar{V}_{L(m-1)}} \cdot \left( N_{1,(m-1)} \cdot \bar{V}_{1,(m-1)} - N_{2,(m-1)} \cdot \bar{V}_{2,(m-1)} + \bar{a}_{L(m-1)} \right) + \frac{\bar{V}_{L_0(m-1)}}{\bar{V}_{L(m-1)}} \cdot \frac{n_{L_0(m-1)}}{L}, \\
 L = \frac{n_{L_0 m}}{\frac{\bar{V}_{L_m}}{\bar{V}_{L_0 m}} \left[ 3 - \frac{\Delta t}{\bar{V}_{L_m}} \cdot \left( N_{1,m} \cdot \bar{V}_{1,m} - N_{2,m} \cdot \bar{V}_{2,m} + \bar{a}_{L_m} \right) \right]}, \\
 \sum_{r=m-1}^m N_{1,r} = N_{1\Sigma}, \quad \frac{1}{2} \sum_{r=m-1}^m \bar{V}_{1,r} = \bar{V}_{1\Sigma}, \\
 \sum_{r=m-1}^m N_{2,r} = N_{2\Sigma}, \quad \frac{1}{2} \sum_{r=m-1}^m \bar{V}_{2,r} = \bar{V}_{2\Sigma}, \\
 n_{L_0 m} = 1, 2, 3, \\
 \frac{1}{t_{0(r+1)} \cdot q_{L(r+1)}} \geq A - B, \\
 A = \frac{q_{L_0(r+1)} \cdot \bar{V}_{L_0(r+1)} + \frac{\Delta t}{L} \left( N_{1,(r+1)} \cdot \bar{V}_{1,(r+1)} - N_{2,(r+1)} \cdot \bar{V}_{2,(r+1)} + \bar{a}_{L(r+1)} \right)}{q_{L(r+1)} \pm \frac{n_{p_{r-(r+1)}}}{L} \pm \frac{n_{p_{r-(r+2)}}}{L}}, \\
 B = \frac{q_{L_0 r} \cdot \bar{V}_{L_0 r} + \frac{\Delta t}{L} \left( N_{1,r} \cdot \bar{V}_{1,r} - N_{2,r} \cdot \bar{V}_{2,r} + \bar{a}_{L_r} \right)}{q_{L_r} \pm \frac{n_{p_{r-(r+1)}}}{L}}, \\
 q_{L_0 r} \geq \frac{1}{6,5 \cdot e^{0,009 \cdot \bar{V}_{CB}}}, \\
 \bar{V}_{L_r} = \frac{\bar{V}_{L_0 r}}{\left( \frac{q_{L_r}}{a} \right)^3 + 1} \cdot e^{\frac{1}{2} \left( \frac{q_{L_r}}{q_{\max}} - m \right)^2}.
 \end{array} \right. \quad (2)$$

Для випадку дорожньо-транспортної ситуації рис. 1 б) можливо записати:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 n_{Lr} \pm n_{Pr} = 3, \\
 n_{L(r-1)} \pm n_{Pr-(r-1)} \pm n_{p(r-1)-(r-2)} = \frac{\Delta t}{\bar{V}_{L(r-1)}} \cdot \left( N_{1,(r-1)} \cdot \bar{V}_{1,(r-1)} - N_{2,(r-1)} \cdot \bar{V}_{2,(r-1)} + \bar{a}_{L(r-1)} \right) + \frac{\bar{V}_{L_0(r-1)}}{\bar{V}_{L(r-1)}} \cdot \frac{n_{L_0(r-1)}}{L}, \\
 n_{L(r+1)} \pm n_{Pr-(r+1)} \pm n_{p(r+1)-(r+2)} = \frac{\Delta t}{\bar{V}_{L(r+1)}} \cdot \left( N_{1,(r+1)} \cdot \bar{V}_{1,(r+1)} - N_{2,(r+1)} \cdot \bar{V}_{2,(r+1)} + \bar{a}_{L(r+1)} \right) + \frac{\bar{V}_{L_0(r+1)}}{\bar{V}_{L(r+1)}} \cdot \frac{n_{L_0(r+1)}}{L}, \\
 L = \frac{n_{L_0r}}{\frac{\bar{V}_{Lr}}{\bar{V}_{L_0r}} \left[ 3 - \frac{\Delta t}{\bar{V}_{Lr}} \cdot \left( N_{1,r} \cdot \bar{V}_{1,r} - N_{2,r} \cdot \bar{V}_{2,r} + \bar{a}_{Lr} \right) \right]}, \\
 \sum_{r-1}^{r+1} N_{1,r} = N_{1\Sigma}, \quad \frac{1}{3} \sum_{r-1}^{r+1} \bar{V}_{1,r} = \bar{V}_{1\Sigma}, \\
 \sum_{r-1}^{r+1} N_{2,r} = N_{2\Sigma}, \quad \frac{1}{3} \sum_{r-1}^{r+1} \bar{V}_{2,r} = \bar{V}_{2\Sigma}, \\
 n_{L_0r} = 1, 2, 3, \\
 \frac{1}{t_{o(r+1)} \cdot q_{L(r+1)}} \geq A - B, \\
 A = \frac{q_{L_0(r+1)} \cdot \bar{V}_{L_0(r+1)} + \frac{\Delta t}{L} \left( N_{1,(r+1)} \cdot \bar{V}_{1,(r+1)} - N_{2,(r+1)} \cdot \bar{V}_{2,(r+1)} + \bar{a}_{L(r+1)} \right)}{q_{L(r+1)} \pm \frac{n_{Pr-(r+1)}}{L} \pm \frac{n_{Pr-(r+2)}}{L}}, \\
 B = \frac{q_{L_0r} \cdot \bar{V}_{L_0r} + \frac{\Delta t}{L} \left( N_{1,r} \cdot \bar{V}_{1,r} - N_{2,r} \cdot \bar{V}_{2,r} + \bar{a}_{Lr} \right)}{q_{Lr} \pm \frac{n_{Pr-(r+1)}}{L}}, \\
 q_{L_0r} \geq \frac{1}{6,5 \cdot e^{0,009 \cdot \bar{V}_{cb}}}, \\
 \bar{V}_{Lr} = \frac{\bar{V}_{L_0r}}{\left( \frac{q_{Lr}}{a} \right)^3 + 1} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{q_{Lr}}{q_{\max}} - m \right)^2}.
 \end{array} \right. \quad (3)$$

Для випадку дорожньо-транспортної ситуації рис. 1 в) можливо записати:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 n_{L1} \pm n_{p1} = 3, \\
 n_{L2} \pm n_{p1-2} \pm n_{p2-3} = \frac{\Delta t}{\bar{V}_{L2}} \cdot (N_{1,2} \cdot \bar{V}_{1,2} - N_{2,2} \cdot \bar{V}_{2,2} + \bar{a}_{L2}) + \frac{\bar{V}_{L02}}{\bar{V}_{L2}} \cdot \frac{n_{L02}}{L}, \\
 L = \frac{n_{L01}}{\frac{\bar{V}_{L1}}{\bar{V}_{L01}} \left[ 3 - \frac{\Delta t}{\bar{V}_{L1}} \cdot (N_{1,1} \cdot \bar{V}_{1,1} - N_{2,1} \cdot \bar{V}_{2,1} + \bar{a}_{L1}) \right]}, \\
 \sum_{r=1}^2 N_{1,r} = N_{1\Sigma}, \quad \frac{1}{2} \sum_{r=1}^2 \bar{V}_{1,r} = \bar{V}_{1\Sigma}, \\
 \sum_{r=1}^2 N_{2,r} = N_{2\Sigma}, \quad \frac{1}{2} \sum_{r=1}^2 \bar{V}_{2,r} = \bar{V}_{2\Sigma}. \\
 n_{L0m} = 1, 2, 3. \\
 \frac{1}{t_{o(r+1)} \cdot q_{L(r+1)}} \geq A - B, \\
 A = \frac{q_{L0(r+1)} \cdot \bar{V}_{L0(r+1)} + \frac{\Delta t}{L} (N_{1,(r+1)} \cdot \bar{V}_{1,(r+1)} - N_{2,(r+1)} \cdot \bar{V}_{2,(r+1)} + \bar{a}_{L(r+1)})}{q_{L(r+1)} \pm \frac{n_{p_{r-(r+1)}}}{L} \pm \frac{n_{p_{r-(r+2)}}}{L}}, \\
 B = \frac{q_{L0r} \cdot \bar{V}_{L0r} + \frac{\Delta t}{L} (N_{1,r} \cdot \bar{V}_{1,r} - N_{2,r} \cdot \bar{V}_{2,r} + \bar{a}_{Lr})}{q_{Lr} \pm \frac{n_{p_{r-(r+1)}}}{L}}, \\
 q_{L0r} \geq \frac{1}{6,5 \cdot e^{0,009 \cdot \bar{V}_{CB}}}, \\
 \bar{V}_{Lr} = \frac{\bar{V}_{L0r}}{\left( \frac{q_{Lr}}{a} \right)^3 + 1} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{q_{Lr}}{q_{\max}} - m \right)^2}.
 \end{array} \right. \quad (4)$$



У (2)...(4)  $t_0$  - загальний середній час необхідний для забезпечення виконання маневру попередження виникнення аварійно-небезпечної ситуації, шляхом застосування екстреного гальмування зі зниженням швидкості до швидкості руху однорядного транспортного потоку, по якому проводиться аналіз [5].

З застосуванням отриманих залежностей (2)...(4) можливо розкрити кількісні характеристики схем взаємодій транспортних засобів у дорожньо-транспортних ситуаціях, що визначаються для окремого транспортного засобу відповідного ряду руху з урахуванням наявності одного транспортного засобу попереду та позаду на смузі руху. Синтезовані залежності уособлюють математичні теоретичні основи для розкриття безпеки руху багаторядних щільних транспортних потоків на мікроскопічному рівні дослідження за характерними дорожньо-транспортними ситуаціями.

### **Висновок**

У роботі синтезовані основні рівняння багаторядного щільного транспортного потоку за характерними дорожньо-транспортними ситуаціями з урахуванням виконання умови адекватного сприйняття відносного між собою руху рядів з можливістю виконання екстреного гальмування для порівняння швидкостей відповідних транспортних засобів з сусідніх рядів руху. Розроблені основні рівняння забезпечують можливість їх подальшого розвитку до рівнянь забезпечення безпеки руху багаторядних щільних транспортних потоків.

### **Література**

- 1) <http://zastraxuy.com.ua/?tag=statistika-dtp>.
- 2) Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2008 році.
- 3) Дудніков О.М. Основне рівняння багаторядного щільного транспортного потоку на ділянці дороги визначеної довжини / О.М. Дудніков // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Науково-технічний збірник / НТУ. – К.: НТУ, 2012. – Випуск . – С. 236 – 243.
- 4) Красников А.Н. Закономерности движения на многополосных автомобильных дорогах / А.Н. Красников. – М.: Транспорт, 1988. – 111 с.
- 5) Домке Э.Р. Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий / Э.Р. Домке. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 288 с.