

УДК 656.021.2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ПІДВИЩЕНОЇ ЩІЛЬНОСТІ

В.В. Ширін, доц., к.т.н.,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Визначено, що застосування відомих моделей транспортного потоку для визначення пропускної здатності автомобільних доріг ускладнене через розбіжність значень дистанції між автомобілями в потоці. На підставі експериментальних досліджень визначено характер взаємозв'язку дистанції між автомобілями зі швидкістю руху в різних її діапазонах.

Ключові слова: транспортний потік, швидкість, дистанція, інтенсивність, щільність потоку, моделювання.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

В.В. Ширин, доц., к.т.н.,

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Анотація. Выяснено, что применение известных моделей транспортного потока для определения пропускной способности автомобильных дорог затруднено из-за несовпадения значений дистанции между автомобилями в потоке. На основании экспериментальных исследований определен характер взаимосвязи дистанции между автомобилями со скоростью движения в различных ее диапазонах.

Ключевые слова: транспортный поток, скорость, дистанция, интенсивность, плотность потока, моделирование.

STUDY OF THE RELATIONSHIP OF PARAMETERS OF HIGH-DENSITY TRAFFIC FLOW

V. Shirin, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),

Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. It has been established that the use of known patterns of the traffic flow to determine the road capacity is difficult due to different values of the distance between the vehicles in the stream. On the basis of experimental studies there was identified the nature of relationship of the distance between vehicles with the speed of movement within different ranges.

Key words: traffic flow, speed, distance, intensity, density flow, modeling.

Вступ

Особливу проблему організації ефективного транспортного процесу являють собою окремі ділянки вулично-дорожньої мережі, рух на яких ускладнений через високий рівень завантаження. На таких ділянках спостерігається висока щільність транспортних потоків і, у разі виникнення збурень (вимушені зупинки,

дорожньо-транспортні пригоди тощо), в таких потоках виникають передумови передзатового та заторового станів транспортного потоку, що на певний час знижує пропускну здатність вулично-дорожньої мережі. Відомі методи моделювання параметрів транспортних потоків на мікро- та макрорівнях, які дають змогу оцінити параметри потоку в цілому [1–3], або параметри руху окремих ав-

томобілів у щільному потоці [3, 4], який є передумовою передзаторового та заторового режимів руху. Саме тому дослідження транспортних потоків високої щільності є актуальною задачею, адже на основі таких досліджень повинні вирішуватись питання проектування схем організації дорожнього руху та варіантів стратегії управління транспортними потоками.

Аналіз публікацій

Пропускна здатність смуги – одна з найважливіших характеристик, що використовується при розробці заходів щодо підвищення транспортно-експлуатаційних якостей дороги, спрямованих на зростання продуктивності роботи автотранспорту.

Під пропускною здатністю автомобільної дороги розуміють максимальну кількість автомобілів, що може пропустити ділянка дороги в одиницю часу в одному або двох напрямках у розглянутих погодно-кліматичних і дорожніх умовах [5].

Для оцінки пропускної здатності смуги, як правило, використовуються динамічні моделі транспортного потоку [6, 7], оскільки за інтенсивності потоку, рівної або близької до пропускної здатності, має місце взаємний вплив автомобілів у процесі руху.

Відомо, що для визначення пропускної здатності автомобільної дороги використовується зв'язок інтенсивності потоку з його швидкістю і щільністю у вигляді [8]

$$N = q \cdot V, \quad (1)$$

де N – інтенсивність транспортного потоку, авт./год.; q – щільність транспортного потоку, авт./км; V – середня швидкість руху транспортного потоку, км/год.

Задача визначення пропускної здатності автомобільної дороги пов'язана з визначенням оптимальної щільності потоку, за якої функція (1) набуває максимального значення.

Визначення оптимальної щільності ускладнюється, оскільки збільшення щільності призводить до зменшення швидкості, тому функціональна форма залежності (1) набуває вигляду [8]

$$N(q) = q \cdot V(q). \quad (2)$$

Щільність потоку можна розглядати як величину, зворотну середньому інтервалу між послідовними автомобілями, тому рівняння стану транспортного потоку може бути подане у вигляді

$$N = \frac{1}{l} V, \quad (3)$$

де l – середній інтервал між послідовними автомобілями, км.; V – середня швидкість руху транспортного потоку, км./год.

Перші спрощені динамічні моделі були розроблені з метою можливості розрахунку середньої дистанції між автомобілями за різних швидкостей руху та базуються на припущенні, що автомобілі рухаються в колоні з однаковою швидкістю на відстані, достатній для повної зупинки без наїзду на автомобіль, що йде попереду.

Під час аналізу існуючих моделей транспортного потоку було визначено декілька груп спрощених динамічних моделей, що базуються на різних початкових передумовах:

I група – в рівняннях не враховується гальмівний шлях [6];

II група – в рівняннях враховується повний гальмівний шлях [9, 10];

III група – в рівняннях враховується різниця між гальмівними шляхами заднього і переднього автомобілів [11, 12];

IV група – рівняння, отримані в результаті статистичної обробки даних спостережень за відстанню між автомобілями в потоках [13–15].

Порівняльний аналіз виявлених моделей транспортного потоку показав, що значення пропускної здатності, отримані на їх підставі, у значній мірі відрізняються. Так, значення пропускної здатності, що отримані за моделями I групи, постійно зростають зі збільшенням швидкості, що не відповідає дійсності. Моделі II групи дозволяють отримати наближені значення до параметрів реальних потоків, втім відрізняються між собою. Значення пропускної здатності, отримані на підставі моделей III групи, значно нижче інтенсивності реальних потоків, що не відповідає дійсності. Дані моделей IV групи відрізняються між собою (значення інтервалів між автомобілями, за однакової швидкості руху,

наприклад 40 км/год., становить від 15 м до 49 м). Розбіжність у результатах різних моделей спричиняє проблему обґрунтування їх вибору при розв'язанні задач оцінки пропускної здатності автомобільних доріг. У зв'язку з цим виникає необхідність удосконалення існуючих або розробка нових моделей транспортного потоку та методів визначення на їх підставі пропускної здатності доріг.

Мета і постановка завдання

Мета роботи полягає у визначенні взаємозв'язку між швидкістю руху автомобілів та дистанцією між ними в потоці.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести експериментальні дослідження транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міста;
- визначити емпіричну залежність між основними параметрами руху, а саме між дистанцією та швидкістю руху.

Визначення характеру взаємозв'язку параметрів руху в щільних транспортних потоках

Для проведення натурного експерименту було встановлено цифрову відеокамеру в 20 м від проїжджої частини, орієнтовану перпендикулярно напрямку руху. Одночасно в кадр потрапляло 6–7 легкових автомобілів завдовжки 4,5 м і дистанцією між ними 1–2 м.

Відеофіксацію процесу руху щільних потоків було проведено на окремих ділянках вулично-дорожньої мережі м. Харків (Україна), а саме: вул. Дерев'янка (в районі буд. 4) – пост №1; вул. Пушкінська (в районі буд. 69) – пост №2; вул. Артема (в районі буд. 39) – пост №3; вул. Петровського (в районі буд. 23) – пост №4; вул. Мироносицька (в районі буд. 52) – пост №5; вул. Сумська (в районі буд. 52) – пост №6; вул. Іванова (в районі буд. 23) – пост №7; вул. Гіршмана (в районі буд. 9) – пост №8.

У процесі обробки отриманого матеріалу з постів проведення відеозйомки відеозаписи були перетворені в послідовність кадрів з інтервалом 0,2 секунди з використанням спеціального програмного забезпечення Free Video to JPG Converter.

Отримані кадри дозволяють сформувати масив координат положення автомобілів. Елементами отриманого масиву є координати, що описують положення автомобілів в i -й момент часу. Це дає змогу визначити дистанцію між автомобілями, яка становить різницю між лівою координатою автомобіля, що рухається попереду, і правою координатою розглянутого автомобіля. Для першого кадру це виглядає таким чином

$$d_{11} = x_{12}^L - x_{11}^R, \quad (4)$$

де x_{12}^L – координата положення задньої частини автомобіля в кадрі; x_{11}^R – координата положення передньої частини наступного в потоці автомобіля. За початок координат взято лівий край кадру, напрямок руху автомобілів – зліва направо.

Швидкість руху визначається на підставі координат положення геометричного центру автомобіля у двох послідовних кадрах.

Обробку отриманих даних виконано з використанням спеціального програмного забезпечення VideoTraffic.exe [16].

На підставі експериментальних даних, методом найменших квадратів, який реалізується в середовищі Microsoft Office Excel 2010 [17], отримано апроксимуючі залежності дистанції між автомобілями в потоці для різних значень швидкості руху. Отримані апроксимуючі функції в різних діапазонах швидкості руху наведено на рис. 1–8.

Натурні виміри швидкості та дистанції між автомобілями в потоці було проведено в умовах частково та повністю зв'язаного руху, чим пояснюється низька швидкість, значення якої не перевищувало 10,5 м/с.

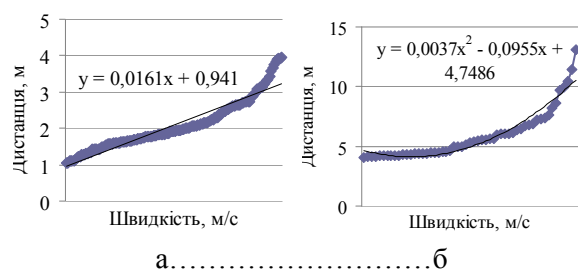
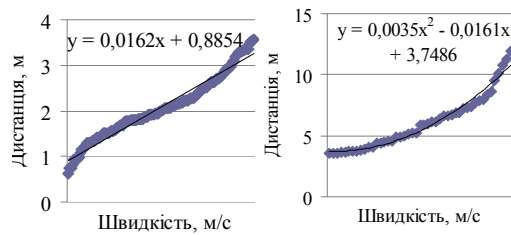
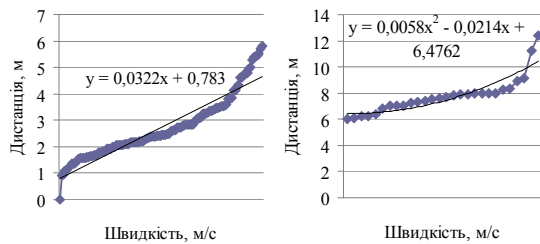


Рис. 1. Функція апроксимації емпіричних даних дистанції між автомобілями на вул. Дерев'янка (пост №1): а – діапазон швидкості 0–3,25 м/с; б – діапазон швидкості 3,26–6,0 м/с



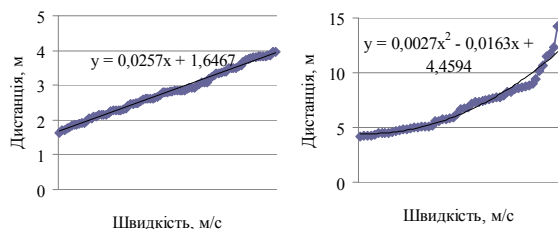
а.....б

Рис. 2. Функція апроксимації емпіричних даних дистанції між автомобілями на вул. Пушкінській (пост №2): а – діапазон швидкості 0–3,25 м/с; б – діапазон швидкості 3,26–7,0 м/с



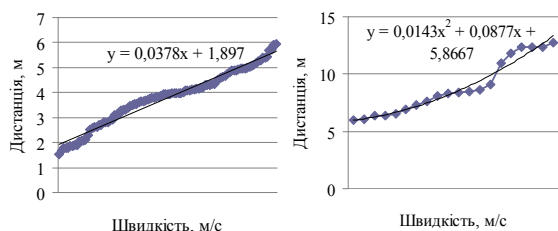
а.....б

Рис. 3. Функція апроксимації емпіричних даних дистанції між автомобілями на вул. Артема (пост №3): а – діапазон швидкості 0–4,0 м/с; б – діапазон швидкості 4,01–7,75 м/с



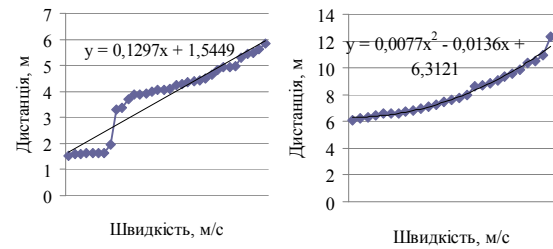
а.....б

Рис. 4. Функція апроксимації емпіричних даних дистанції між автомобілями на вул. Петровського (пост №4): а – діапазон швидкості 0–5,75 м/с; б – діапазон швидкості 5,76–9,0 м/с



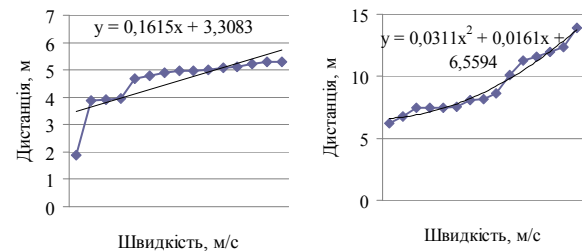
а.....б

Рис. 5. Функція апроксимації емпіричних даних дистанції між автомобілями на вул. Мироносицькій (пост №5): а – діапазон швидкості 0–6,0 м/с; б – діапазон швидкості 6,01–8,25 м/с



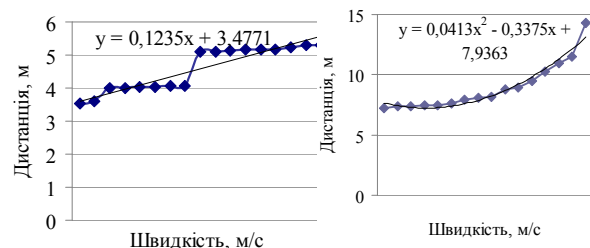
а.....б

Рис. 6. Функція апроксимації емпіричних даних дистанції між автомобілями на вул. Сумській (пост №6): а – діапазон швидкості 0–5,25 м/с; б – діапазон швидкості 5,26–10,0 м/с



а.....б

Рис. 7. Функція апроксимації емпіричних даних дистанції між автомобілями на вул. Іванова (пост №7): а – діапазон швидкості 0–7,0 м/с; б – діапазон швидкості 7,01–8,25 м/с



а.....б

Рис. 8. Функція апроксимації емпіричних даних дистанції між автомобілями на вул. Гіршмана (пост №8): а – діапазон швидкості 0–9,5 м/с; б – діапазон швидкості 9,51–10,0 м/с

Для перевірки регресійних моделей було визначено коефіцієнт кореляції та абсолютне відхилення (табл. 1). В аналітичних залежностях приймаємо позначення: x – швидкість руху (м/с); y – дистанція між автомобілями (м). Значення коефіцієнта кореляції є позитивним і наближеним до 1, що свідчить про те, що існує тісний зв'язок між параметрами швидкості руху та інтервалу між автотранспортними засобами.

Таблиця 1 Результати оцінки регресійних моделей для досліджуваних вулиць

Пост №	Інтервал швидкості руху, м/с	Вигляд функції	Значення коефіцієнта кореляції	Абсолютне відхилення розрахункових значень дистанції, м
1	0–3,25	$y=0,0161x+0,941$	1,00	2,62
	3,26–6,0	$y=0,0037x^2-0,0955x+4,7486$	1,00	6,80
2	0–3,25	$y=0,0162x+0,8854$	1,00	2,46
	3,26–7,0	$y=0,0035x^2-0,0161x+3,7486$	0,98	5,93
3	0–4,0	$y=0,0322x+0,783$	1,00	2,24
	4,01–7,75	$y=0,0058x^2-0,0214x+6,4762$	0,99	8,08
4	0–5,75	$y=0,0257x+1,6467$	1,00	2,30
	5,76–9,0	$y=0,0027x^2-0,0163x+4,4594$	0,96	6,83
5	0–6,0	$y=0,0378x+1,897$	1,00	3,44
	6,01–8,25	$y=0,0143x^2+0,0877x+5,8667$	0,99	9,29
6	0–5,25	$y=0,1297x+1,5449$	1,00	3,23
	5,26–10,0	$y=0,0077x^2-0,0136x+6,3121$	0,98	7,96
7	0–7,0	$y=0,1615x+3,3083$	1,00	0,67
	7,01–8,75	$y=0,0311x^2+0,0161x+6,5594$	0,98	1,99
8	0–9,5	$y=0,1235x+3,4771$	1,00	0,91
	9,51–10,0	$y=0,0413x^2-0,3375x+7,9363$	1,00	2,76

Значення абсолютного відхилення розрахункових значень дистанції між автомобілями від емпіричних для рівняння прямої не перевищує 0,59 м, для ступеневого рівняння – 2,42, що становить 34 і 54 % відповідно. Це свідчить про значне відхилення модельних значень від реальних, втім прийняті моделі дають значно меншу похибку, в порівнянні з іншими видами кореляційних моделей, які було розглянуто, і для яких найменше значення абсолютного відхилення складало 3,07, що становить відповідно 60,3 %.

Отримані результати зміни дистанції між автомобілями в діапазоні швидкості від 0 до 10,5 м/с свідчать про те, що в його межах спостерігається зміна характеру взаємозв'язку дистанції і швидкості руху. На постах № 1, №2, №3, №4 та №6 (відповідно вулицях Дерев'янка, Пушкінській, Артема, Петровського, Сумській) така зміна спостерігається за зростання швидкості понад 5,75 м/с. При цьому залежність зі зростанням швидкості набуває нелінійного характеру. На постах №5, №7 та №8 (вулиці Мироносицька, Іванова та Гіршмана) майже на всьому досліджуваному діапазоні швидкості, в якому визначалась дистанція між автомобілями, такий взаємозв'язок є пропорційним і описується лінійними залежностями.

Отримані результати свідчать про неможливість застосування існуючих залежностей

мікромоделювання для практичних розрахунків пропускної здатності автомобільних доріг, оскільки вони ґрунтуються виключно на нелінійних залежностях динамічного габариту автомобіля.

Висновки

Експериментальні дослідження транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міста Харків проведено на восьми постах спостереження із застосуванням пристроїв відеофіксації процесу руху автомобілів. Умови руху на постах відрізняються, що дало змогу отримати більш широкий обсяг вхідної інформації для визначення взаємозв'язку між параметрами руху транспортних потоків підвищеної щільності.

У результаті обробки даних відеофіксації за допомогою спеціального програмного забезпечення було отримано емпіричні залежності дистанції між автомобілями від швидкості їх руху.

Отриманий результат дозволяє стверджувати, що в різних діапазонах швидкості характер взаємозв'язку змінюється. Це дає можливість аналітичним методом у подальших дослідженнях визначати пропускну здатність досліджуваних ділянок вулично-дорожньої мережі та інтенсивність руху транспортних потоків.

Література

1. Nelson P. On Driver Anticipation, Two-Regime Flow, Fundamental Diagrams, and Kinematic-Wave Theory / P. Nelson // *Transportation Science*. – 2006. – Vol. 40, №2. – P. 165–178.
2. Laval A. [Jorge A mechanism to describe the formation and propagation of stop-and-go waves in congested freeway traffic](#) / A. Jorge Laval, L. Leclercq // *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2010. – Vol. 368, №1928. – P. 4519–4541.
3. Wagner P. Fluid-dynamical and microscopic description of traffic flow: a data-driven comparison / P. Wagner // *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2010. – Vol. 368, №1928. – P. 4481–4495.
4. Nagel K. Still Flowing: Approaches to Traffic Flow and Traffic Jam Modeling / K. Nagel, P. Wagner, R. Woesler // *Operations Research*. – 2003. – Vol. 51, №5. – P. 681–710.
5. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В.В. Сильянов. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
6. Greenshields B. Objective Measurements of Driver Behavior / B. Greenshields, F. Plat // *Highway Vehicle Safety*. – 1968. – Vol. 13. – P. 35–47.
7. Daganzo C. Multinomial probit and qualitative choice a computationally efficient algorithm / Daganzo C., Bouthetier F., Sheffi Y. // *Transportation Science*. – 1977. Vol. 11, №4. – P. 338–358.
8. Руководство по оценке пропускной способности автомобильных дорог; введ. 24.08.1981. – М.: Транспорт, 1982. – 95 с.
9. Бируля А.К. Влияние интенсивности автомобильного движения на его скорость / А.К. Бируля // *Труды Харьковского автомобильно-дорожного института*. – 1957. – Вып. 19. – С. 15–21.
10. Крылов Ю.С. Режим движения и пропускная способность автомобильных дорог / Ю.С. Крылов // *Автомобильные дороги*. – 1959. – №6. – С. 54–56.
11. Фишельсон М. С. Городские пути сообщения: общ. курс: учеб. пособие для вузов по спец. «Гор. стр-во» / М. С. Фишельсон. – М.: Высшая школа, 1967. – 368 с.
12. Поляков А.А. Организация движения на улицах и дорогах / А.А. Поляков. – М.: Транспорт, 1965. – 376 с.
13. Bourne L.S. Urban Systems Development in Central Canada / L.S. Bourne, R.D. MacKinnon. – [University of Toronto Press](#), 2014. – 244 p.
14. Коваленко Л.А. Оценка пропускной способности двухполосных автомобильных дорог с учетом закономерностей поведения водителя: автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.22.11 / Л.А. Коваленко. – Х.: ХНАДУ, 2003. – 18 с.
15. Cremer M. A fast simulation model for traffic flow on the basis of Boolean operations / M. Cremer, J. Ludvig // *Math. Comp Simul.* – 1986. – Vol. 28. – P. 297–303.
16. Ширін В. В. Підвищення ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі міста: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.01 / В.В. Ширін. – Х.: ХНАДУ, 2012. – 22 с.
17. Долженков В.А. Microsoft Office Excel 2010 / В.А. Долженков, А.Б. Стученков. – С.Пб.: БХВ – Петербург, 2011. – 816 с.

Рецензент: П.Ф. Горбачов, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 25 вересня 2015 р.