

УДК 625.7

Нагребельна Л. П., <https://orsid.org/0000-0002-5615-9075>

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЬ УТВОРЕННЯ ЗАТОРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ

Анотація

Вступ. Обґрунтовано доцільність застосування основної діаграми транспортного потоку, як основи транспортного моделювання та визначено послідовність розрахунків параметрів потоку для побудови діаграми у вигляді залежностей транспортного потоку.

Проблематика. Описано дослідження відомих фахівців у галузі математичного моделювання дорожнього руху, які продовжують інтенсивно працювати в цьому напрямку. Доведено, що проблема предзаторового і заторового режимів руху ще до кінця не вивчена і є основною при управлінні дорожнім рухом у великих містах [1, 2].

Вибір типу технології управління залежить від постановки завдання і цілі управління дорожнім рухом. Проведений аналіз математичного забезпечення відомих у світі систем управління [3], показав, що воно засноване на реалізації макро та мікро моделей взаємозалежності основних параметрів транспортного потоку та параметрів руху окремих транспортних засобів.

Основу моделювання транспортного потоку становлять макро і мікромоделі: перші макроскопічні моделі (гідродинамічні), в яких транспортний потік розглядається подібним потоку стисливої рідини (М. Лайтхілл і Дж. Уїзем, П. Річардс (LWR)) [4] і перші мікроскопічні моделі (слідування за лідером), які описують рух кожного автомобіля (А. Решель, Л. Пайнс) [5].

Мета. Підвищення ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі міст за рахунок визначення балансу між параметрами дорожнього руху. Визначення місць утворення заторів за допомогою гідродинамічної моделі та залежностей транспортного потоку.

Матеріали та методи. Наведено основні залежності транспортного потоку із урахуванням кількості смуг руху. За методом гідродинамічної моделі розраховано і визначено місця де можуть утворитися заторові стани. Графічно показано основні залежності транспортного потоку. Методом порівняння й ототожнення показано як буде змінюватися щільність, інтенсивність, швидкість залежно від зміни кількості смуг руху.

Методом гідродинамічної моделі розраховано та визначено місця, де може утворитися затор. Графічно показано основні залежності транспортного потоку, як буде змінюватися щільність, інтенсивність, швидкість залежно від зміни кількості смуг руху.

Результати. Інтенсивність змінюється залежно від швидкості руху. Чим більша швидкість руху, тим менша інтенсивність. Із залежності «Інтенсивність — щільність» видно, що чим більша інтенсивність тим менша щільність потоку. Із залежності «Щільність — довжина черги» випливає, що чим більша щільність потоку, тим більшою буде довжина черги.

Висновки. Оскільки затор виникає у тому випадку, коли в транспортній мережі з'являються перегони «вузькі місця», тому, управління у вимушеному режимі руху, у першу чергу, має бути спрямоване на створення таких умов руху, при яких задовольняються обмеження для усіх перегонів вулично-дорожньої мережі.

Затор, сконцентрований у межах малої зони, чинить вплив на інші транспортні потоки і у випадку, якщо інтенсивність руху перевищує пропускну спроможність, затор поширюється на великі відстані. Щоб уникнути подібної ситуації, необхідно розосереджувати затори з метою зменшення впливу на інші транспортні потоки.

Ключові слова: гідродинамічна модель, затор, моделювання, пропускна здатність, транспортний потік.

Вступ

Досить тривалий час проблема автомобільного руху є головною для великих міст нашої країни. Транспортні затори на дорогах стають причиною не тільки часових, а й економічних і народногосподарських витрат. Тому питання управління дорожнім рухом (ДР) стає досить актуальним у дійсний час. Вирішенню цієї проблеми сприяє розвиток систем управління дорожнім рухом, що впливає на комунікаційну функцію сталого розвитку міста. Дорожній рух розглядаємо як сукупність транспортного потоку (ТП), пішохідного потоку (ПП) та вулично-дорожньої мережі (ВДМ).

Ефективне управління ДР у таких складних умовах повинно забезпечувати завантаження ВДМ із урахуванням її пропускної спроможності на підставі організації рівномірного руху ТП, тоді, як саме при цьому режимі руху соціальні, екологічні та економічні критерії ефективності мають оптимальне значення.

Незважаючи на те, що розрахункова величина пропускної спроможності вулиць і доріг є нормативним параметром, при проектуванні ВДМ у процесі ДР вона стає величиною змінною і залежить від кліматичних умов, ремонтних робіт та від інших надзвичайних ситуацій (наприклад, ДТП), також як і нерівномірність інтенсивності ТП. На підставі цього, мета управління і завдання збільшення пропускної здатності зводиться до забезпечення балансу між реальною пропускною спроможністю ВДМ та інтенсивністю ТП.

На сьогоднішній день складності формалізації процесу руху транспортного потоку стали серйозною причиною відставання результатів наукового дослідження від вимог практики.

Тому, головною задачею математичного моделювання є визначення та прогнозування усіх параметрів функціонування вулично-дорожньої мережі. Сюди відноситься інтенсивність руху, швидкість, затримки та втрати часу. Існуючі математичні моделі дуже різноманітні за математичним апаратом, вирішенням задач, за ступенем деталізації опису руху.

Для управління ДР на транспортній мережі міст в усьому світі використовуються системи управління, алгоритми функціонування яких засновані на моделях транспортних потоків. При цьому вимоги до точності й адекватності моделей досить високі. Транспортне моделювання дозволяє вирішувати завдання проектування нових і модернізації існуючих систем управління і схем організації дорожнього руху, а також усувати надзвичайні ситуації на ВДМ.

Вибір типу технології управління залежить від постановки завдання і цілі управління ДР. Проведений аналіз математичного забезпечення відомих у світі систем управління [3] показав, що воно засноване на реалізації макро- та мікромоделей взаємозалежності основних параметрів ТП та параметрів руху окремих транспортних засобів.

На даний момент часу накопичилася величезна кількість матеріалів, присвячених транспортній проблемі, які реферуються в таких відомих наукових журналах як: «Transportation Research», «Physical Review E», «Review of modern physics», «Transportation Science».

Незважаючи на те, що понад півстоліття провідні відомі фахівці в галузі математичного моделювання ДР інтенсивно працюють у цьому напрямку, проблема предзаторового і заторового режимів руху ще до кінця не вивчена [6] і є основною при управлінні ДР у великих містах.

Основу моделювання ТП становлять макро- та мікромоделі: перші макроскопічні моделі (гідродинамічні), в яких транспортний потік розглядають подібним потоку стисливої рідини (М. Лайтхілл і Дж. Візем, П. Річардс (LWR)) [4] і перші мікроскопічні моделі (слідування за лідером), які описують рух кожного автомобіля (А. Решель, Л. Пайнс) [5]. У моделі наводиться опис функціональної залежності (рівняння стану) між інтенсивністю потоку (N), швидкістю (v) та щільністю (q).

Цю залежність називають основною діаграмою транспортного потоку, так як вона дозволяє не тільки визначати параметри ТП, а й межі переходу ТП з одного стану в інший (вільний-синхронізований-стислий), що дозволило обґрунтувати та визначити рівні завантаження ВДМ [7]: вільний рух (автомобілі рухаються у вільних умовах, взаємодія між автомобілями відсутня); частково зв'язаний рух (автомобілі рухаються групами, виникає багато обгонів); зв'язаний рух (у потоці ще існують великі інтервали між автомобілями, обгони ускладнені); насичений рух (суцільний потік автомобілів, що рухається з малими швидкостями); щільний рух, насичений (потік рухається з зупинками, виникають затори).

Основна частина

Затор виникає за умови, коли інтенсивність близька до пропускної здатності, коли автомобільна дорога з якихось причин не справляється зі своєю функцією.

За методом гідродинамічної моделі розрахуємо та визначимо місця, де може утворитися затор. Графічно покажемо основні залежності транспортного потоку, як буде змінюватися щільність, інтенсивність, швидкість залежно від зміни кількості смуг руху.

Максимальна інтенсивність смуги руху при швидкості v знаходиться:

$$Nv = \frac{1000v}{(d_{\min} + L)E^{v/v_0}}, \quad (1)$$

де d_{\min} — мінімальна дистанція в заторовій ситуації, м ($d_{\min} = 1$ м);

$E = 2,718$;

L — середня довжина автомобіля в транспортному потоці, яку обчислюють за формулою:

$$L = \frac{4,2a + 7,0b + 10,5c + 12,0d}{100}. \quad (2)$$

$$L = \frac{4,2 \cdot 30 + 7,0 \cdot 55 + 10,5 \cdot 5 + 12,0 \cdot 10}{100} = 6,84.$$

$$Nv = \frac{1000 \cdot 40}{(1 + 6,84)2,718^{40/25}} = 1030 \text{ авт/год при } v = 40 \text{ км/год.}$$

Максимальну інтенсивність для двох та для трьох смуг руху при швидкості v обчислюють відповідно за формулами (3) та (4):

– для двох смуг:

$$Nv = \frac{2000v}{(d_{\min} + L)E^{v/v_0}}, \quad (3)$$

– для трьох смуг:

$$Nv = \frac{3000v}{(d_{\min} + L)E^{v/v_0}}. \quad (4)$$

Інтенсивність змінюється залежно від швидкості руху. Чим більша швидкість руху, тим менша інтенсивність. Це пояснюється залежністю «Інтенсивність – швидкість». Результати розрахунку для однієї смуги руху для двох та для трьох смуг руху показано на рис. 1.

З розрахунку видно, що інтенсивність залежить від швидкості. Чим більша швидкість, тим менша інтенсивність. А значить, при утворенні затору, черга збільшується за рахунок інтенсивності. Чим більша інтенсивність, тим більша довжина черги. Якщо процес надходження автомобілів

рівномірний, то черга буде меншою, ніж тоді коли транспортний потік буде рухатися по типу «ударна хвиля».

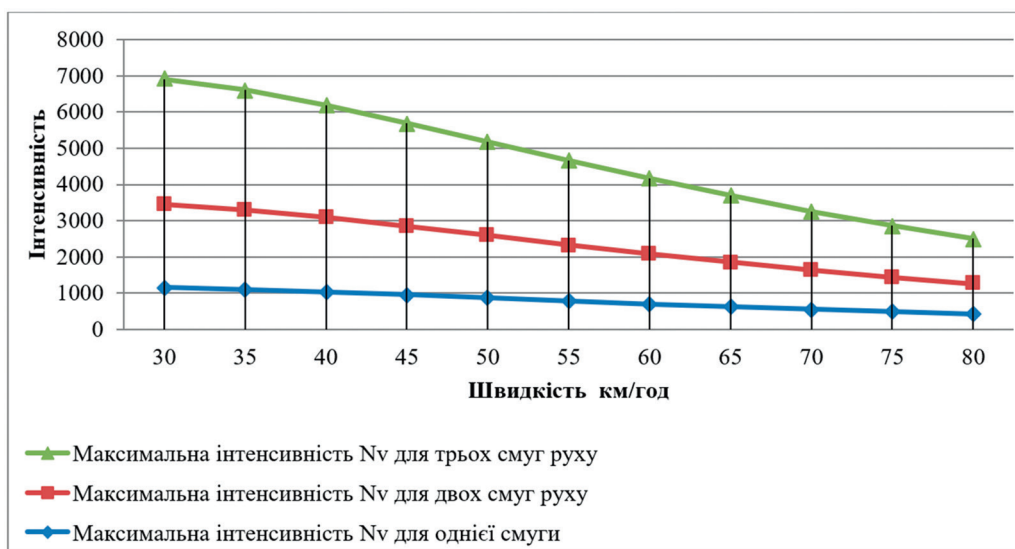


Рисунок 1 — Залежність «Інтенсивність – швидкість»

Для визначення довжини черги, слід визначити щільність транспортного потоку. З рівняння стану транспортного потоку, знайдемо щільність:

$$N = g \cdot v, \tag{5}$$

$$g = \frac{N}{v}, \tag{6}$$

де N — інтенсивність руху, авт./год;
 g — щільність руху, авт./км;
 v — швидкість руху, км/год.

Розрахунки щільності транспортного потоку зведено у табл. 1 та зображено на рис. 2, рис. 3 та рис. 4.

Таблиця 1

Залежність «Щільність – інтенсивність»

Швидкість, км/год	для однієї смуги		для двох смуг руху		для трьох смуг руху	
	Максимальна інтенсивність Nv	Щільність потоку g, авт./км	Максимальна інтенсивність Nv	Щільність потоку g, авт./км	Максимальна інтенсивність Nv	Щільність потоку g, авт./км
1	2	3	4	5	6	7
30	1 153	38	2 305	77	3 458	115
35	1 101	31	2 202	63	3 303	94
40	1 030	26	2 061	52	3 091	77

Кінець таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7
45	949	21	1 898	42	2 847	63
50	863	17	1 727	35	2 590	52
55	777	14	1 555	28	2 332	42
60	694	12	1 389	23	2 083	35
65	616	9	1 232	19	1 848	28
70	543	8	1 086	16	1 629	23
75	476	6	953	13	1 429	19
80	416	5	832	10	1 248	16

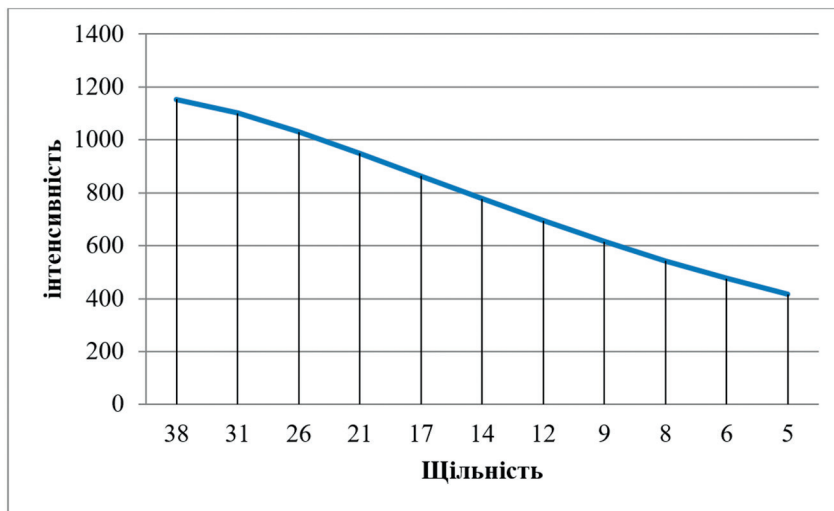


Рисунок 2 — Залежність «Інтенсивність – щільність» для однієї смуги руху

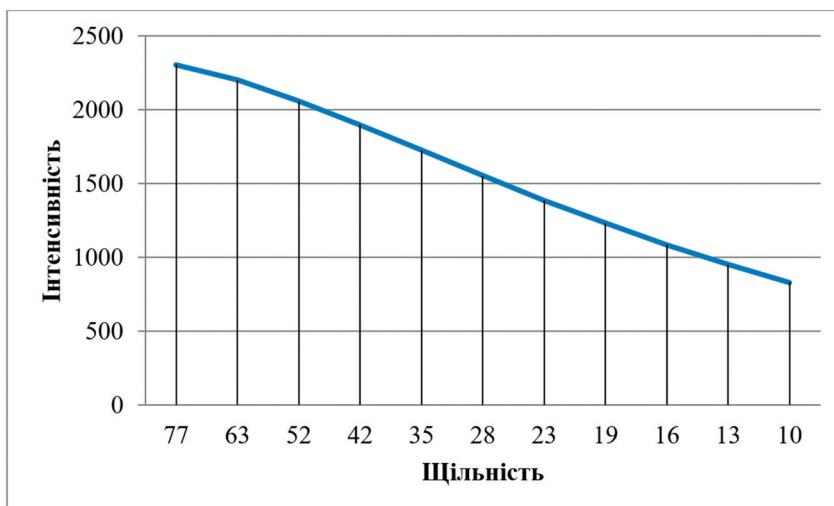


Рисунок 3 — Залежність «Інтенсивність – щільність» для двох смуг руху

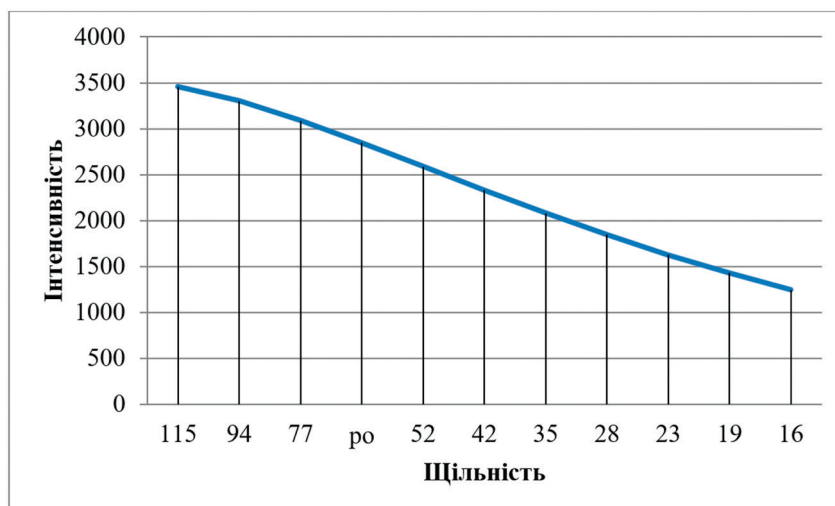


Рисунок 4 — Залежність «Інтенсивність – щільність» для трьох смуг руху

Із залежності «Інтенсивність – щільність» видно, що чим більша інтенсивність тим менша щільність потоку.

Оскільки щільність потоку визначили, можна визначити довжину черги. Довжину черги визначимо за формулою (7):

$$L_{\text{черги}} = \frac{(l_c + d_{\text{min}}) \cdot g}{1}, \quad (7)$$

де l_c — середня довжина автомобіля;
 d_{min} — мінімальна дистанція між автомобілями.

Розрахунок зведено у табл. 3 та показано на рис. 5, рис. 6 та рис. 7

Таблиця 2

Розрахунок довжини черги для однієї, двох, трьох смуг руху

Дистанція між автомобілями d_{min}	Середня довжина автомобіля L	Швидкість v	для однієї смуги		для двох смуг		для трьох смуг	
			Щільність потоку g , авт./км	Довжина черги	Щільність потоку g , авт./км	Довжина черги	Щільність потоку g , авт./км	Довжина черги
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	6,84	30	38	301	77	602	115	904
1	6,84	35	31	247	63	493	94	740
1	6,84	40	26	202	52	404	77	606
1	6,84	45	21	165	42	331	63	496
1	6,84	50	17	135	35	271	52	406
1	6,84	55	14	111	28	222	42	332
1	6,84	60	12	91	23	181	35	272
1	6,84	65	9	74	19	149	28	223

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	6,84	70	8	61	16	122	23	182
1	6,84	75	6	50	13	100	19	149
1	6,84	80	5	41	10	82	16	122

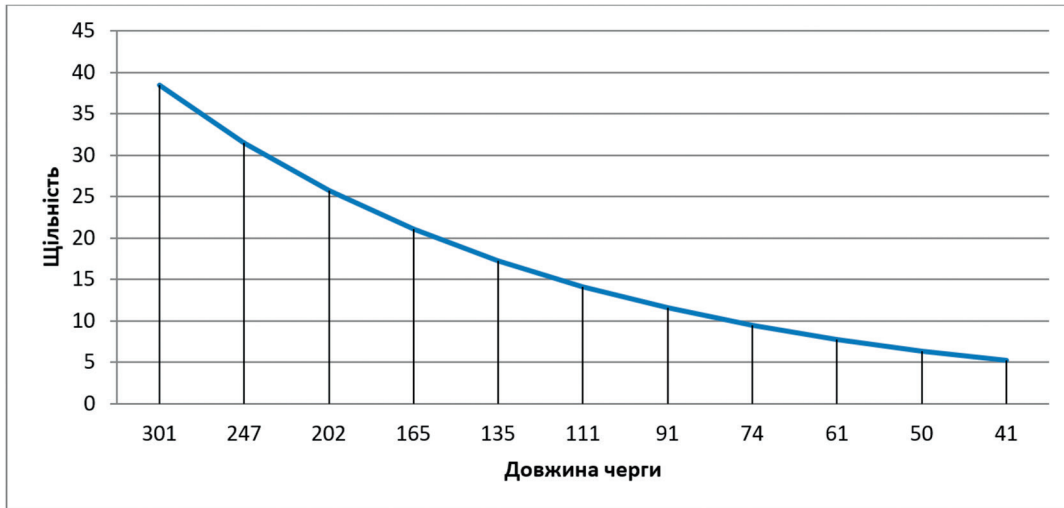


Рисунок 5 — Довжина черги для однієї смуги руху

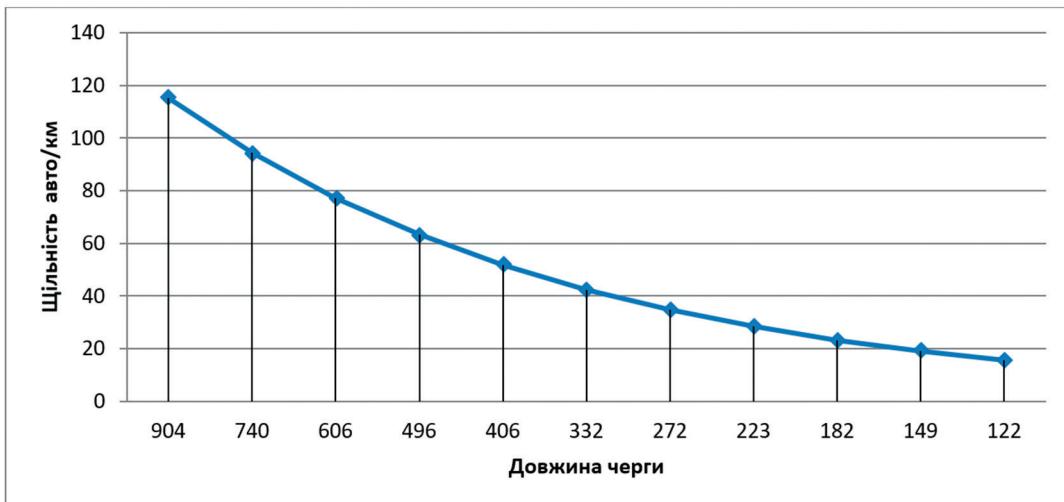


Рисунок 6 — Довжина черги для двох смуг руху

Отже, чим більша щільність потоку, тим більшою буде довжина черги. Якщо вулично-дорожня мережа має три смуги руху з максимальною інтенсивністю 3 458 авт./год, то при зменшенні швидкості руху, утвориться затор і довжина черги буде сягати майже 1 км. Такі затори будуть створюватися при закритті смуги руху, утворення так званого «вузького місця», це змусить водіїв зменшувати швидкість руху. Тому потрібно визначити такі «вузькі місця» для розроблення заходів для швидкої ліквідації заторів.

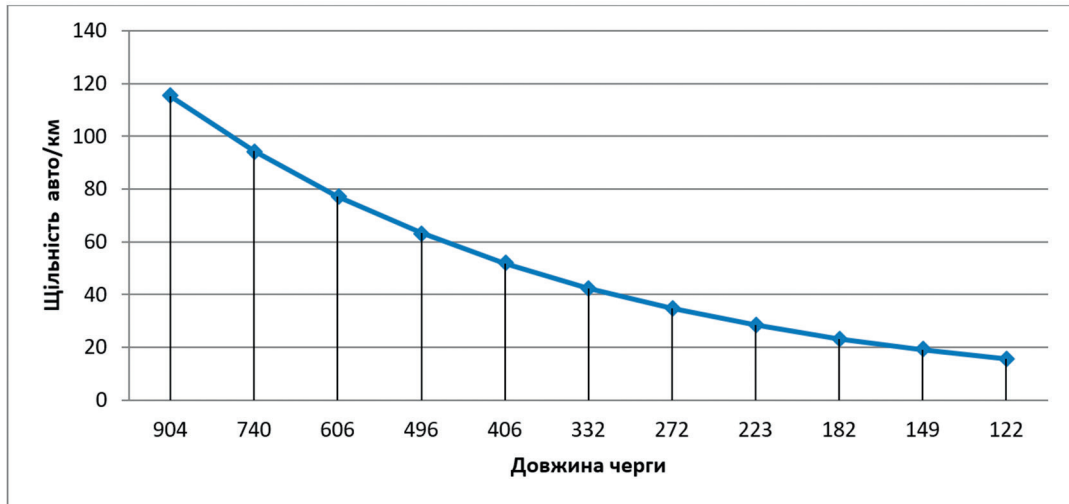


Рисунок 7 — Довжина черги для трьох смуг руху

Як відомо, рівень завантаженості окремої ділянки вулично-дорожньої мережі автотранспортними засобами визначається відношенням інтенсивності руху на ділянці до пропускної здатності проїзної частини відповідної ділянки. За різних рівнів завантаженості, забезпечуються різні рівні зручності та безпеки дорожнього руху.

Пропускную здатність однієї смуги руху обчислюють за формулою:

$$P = \frac{1\,000v_0}{(d_{\min} + L)E} \tag{8}$$

Для двох смуг руху:

$$P = \frac{2\,000v_0}{(d_{\min} + L)E} \tag{9}$$

Для трьох смуг руху:

$$P = \frac{3\,000v_0}{(d_{\min} + L)E} \tag{10}$$

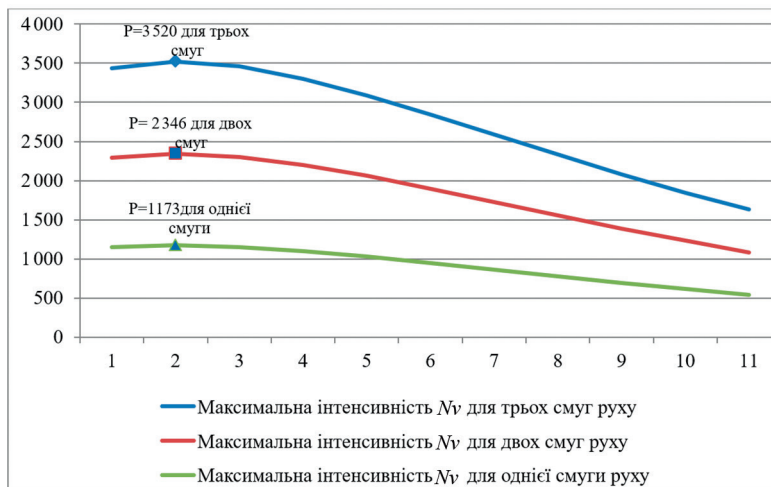


Рисунок 8 — Пропускна здатність для однієї, двох, трьох смуг руху

Для розрахунку довжини черги, щільності транспортного потоку використано метод гідродинамічної моделі. Результат графічно показано на основній діаграмі транспортного потоку для різної кількості смуг руху.

Висновок

Транспортні потоки характеризуються: інтенсивністю, складом, швидкістю, інтервалами між автомобілями, щільністю потоку. Внаслідок взаємодії автомобілів у потоці всі ці характеристики функціонально зв'язані одна з одною.

Розроблення та впровадження заходів, пов'язаних із удосконаленням управління дорожнім рухом повинні бути спрямовані, у першу чергу, на підвищення пропускної здатності головних транспортних артерій міста — магістральної вулично-дорожньої мережі з найбільш інтенсивним рухом і завантаженістю.

Разом з тим, слід зазначити, що одним із важливих аспектів задачі з удосконалення управління дорожнім рухом є її розгляд із позиції забезпечення гнучкості щодо врахування станів потоків та їх можливих змін на ділянках вулично-дорожньої мережі, і лише потім, з огляду на це, необхідно орієнтуватися на доцільності впровадження тих чи інших заходів.

Найбільш ефективні заходи — ті, які можуть зберігати свою ефективність за різних рівнів завантаженості доріг.

Оскільки затор виникає в тому випадку, коли в транспортній мережі з'являються перегони «вузькі місця», тому, управління у вимушеному режимі руху, у першу чергу, має бути спрямоване на створення таких умов руху, за яких задовольняються обмеження для усіх перегонів вулично-дорожньої мережі.

Затор, сконцентрований у межах малої зони, чинить вплив на інші транспортні потоки та у випадку, якщо інтенсивність руху перевищує пропускну спроможність, затор поширюється на великі відстані. Щоб уникнути подібної ситуації, необхідно розосереджувати затори з метою зменшення впливу на інші транспортні потоки.

Список літератури

1. Нагребельна Л.П., Поліщук В.П. До питання про затори на вулично-дорожній мережі міст. *LXXIV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*. Київ, 2018. 564 с.
2. Нагребельна Л.П., Поліщук В.П. Використання теорії масового обслуговування для удосконалення управління дорожнім рухом на магістральній вулично-дорожній мережі міст. *Web of Scholar*. Вип. 4 (46). С. 8-12. DOI: 10.31435/rsglobal_wos/30042020/7039 (дата звернення 15.07.2020).
3. Абрамова Л.С., Нагорний Є.В. Концептуальний підхід до проектування систем управління дорожнім рухом. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. Харків, 2017. № 12. С. 94-100.
4. Lighthill M.J., Whitham G.B. On kinematic waves. II. Theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London*. London, 1955. Vol. 229 (1178). P. 281-345. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1955.0089> (дата звернення 8.06.2020).
5. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. Москва, 1977. 627 с.
6. Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б. Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учеб. пособ. Москва, 2013. Издание 2-е. 428 с.
7. Семенов В.В. Смена парадигмы в теории транспортных потоков. Москва, 2006. 32 с.

URL: https://www.keldysh.ru/papers/2006/prep46/prep2006_46.html (дата звернення: 15.07.2020).

References

1. Nahrebelna L., Polishchuk V. Do pytannia pro zatory na vulychno-dorozhniy mrezhi mist. LXXIV naukova konferentsiia profesorsko-vykladatskoho skladu, aspirantiv, studentiv ta spivrobotnykiv vidokremlyenykh strukturnykh pidrozdiliv universytetu. Kyiv, 2018. 564 p. [in Ukrainian].
2. Nahrebelna L., Polishchuk V. Use of Queuing Theory for Improvement of Traffic Management on the Main Street and Road Network of Cities. *Web of Scholar*. 2020. Vol. 4 (46). P. 8-12. DOI: 10.31435/rsglobal_wos/30042020/7039 (Last accessed: 15.07.2020) [in Ukrainian].
3. Abramova L.S., & Nahorni, Ye.V. Kontseptualnyi pidkhid do proektuvannia system upravlinnia dorozhnim rukhom (Conceptual approach to the traffic control systems design). *Avtomobil' i elektronika. Sučasni tehnologii*. Kharkiv, 2017. N 12. P. 94-100 [in Ukrainian].
4. Lighthill, M.J., Whitham, G.B. On kinematic waves. II. Theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London*. London, 1955. Vol. 229 (1178). P. 281-345. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1955.0089> (Last accessed: 8.06.2020) [in English].
5. Uizem Dzh. Lineynye i nelineynye volny (Linear and nonlinear waves). Moscow, 1977. [in Russian].
6. Gasnikov A.V., Klenov S.L., Nurminskij E.A., Holodov Ya.A., Shamraj N.B. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnyh potokov (Introduction to the mathematical modeling of traffic flows) : tutorial. Moscow, 2013. 2nd ed., rev. 428 p. [in Russian].
7. Semyonov, V.V. (2006). Smena paradigmy v teorii transportnyh potokov (Change of the Paradigm in the Traffic Flow Theory). Preprint, Inst. Appl. Math., the Russian Academy of Science. URL: https://www.keldysh.ru/papers/2006/prep46/prep2006_46.html (Last accessed: 15.07.2020) [in Russian].

Liudmyla Nahrebelna, <https://orsid.org/0000-0002-5615-9075>

M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine

DETERMINATION OF PLACES OF CONGESTION OCCURRENCE BY HYDRODYNAMIC MODEL AND DEPENDENCES OF TRAFFIC FLOW

Abstract

Introduction. The expediency of using the main traffic flow diagrams as the basis of transport modeling is substantiated and the sequence of calculations of traffic flow parameters for construction of the diagram in the form of traffic flow dependences is determined.

Issue Statement. The research of well-known specialists in the field of mathematical modeling of road traffic, who continue to work intensively in this direction, is described. It is proved that the problem of pre-traffic congestion and traffic congestion modes has not been fully studied and is the base for traffic management in large cities [1–2].

The selection of the control technology type depends on the task and purpose of traffic management. The analysis of mathematical support of world-famous control systems [3] showed that it is based on the implementation of macro and micro models of interdependence of the main parameters of the traffic flow and the parameters of movement of individual vehicles.

The basis of traffic flow modeling are macro and micromodels: the first macroscopic models (hydrodynamic), in which the traffic flow is considered similar to the flow of compressible fluid

(M. Lighthill and J. Wisem, P. Richards (LWR)) [4] and the first microscopic models (following by the leader), which describe the movement of each car (A. Rochelle, L. Pines) [5].

Purpose. Improving the efficiency of the street and road city network operation by determining the balance between road traffic parameters. Determination of places of congestion occurrence by hydrodynamic model and dependences of traffic flow.

Materials and methods. The main dependences of the traffic flow taking into account the number of traffic lanes are given. According to the method of hydrodynamic model, the places where congestion can be occurred are calculated and determined. The main dependences of the traffic flow are graphically shown. The method of comparison and identification shows how the density, intensity and speed will be changed depending on the change in the number of traffic lanes.

The places where congestion can be occurred are calculated and determined using the method of hydrodynamic model. The main dependences of the traffic flow, the change in the density, intensity and speed depending on the change in the number of traffic lanes are graphically shown.

Results. The intensity is varied depending on the traffic speed. The higher is the speed, the lower is the intensity. From the dependence «Intensity – density» it is seen that the bigger is the intensity, the lower is the traffic flow density. From the dependence «Density – traffic queue length» it follows that the bigger is the density of the traffic flow, the greater is the length of the traffic queue.

Conclusions. Since congestion occurs when there are "bottlenecks" in the transport network, therefore, traffic management in a forced mode, in the first place, should be aimed at creating such traffic conditions that meet the restrictions for all the road sections located between the intersections in the road network.

Congestion concentrated within a small area affects other traffic flows and if the traffic volume exceeds the road capacity, the congestion spreads over long distances. To avoid this situation, it is necessary to disperse traffic jams in order to reduce the impact on other traffic flows.

Keywords: hydrodynamic model, congestion, modeling, carrying capacity, traffic flows.