

УДК 656.13.022

**В.І.Єресов, О.В.Григор'єва**  
**Національний транспортний університет**  
**АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ТРАНСПОРТНОМУ ПОТОЦІ**

*В статті пропонується розглядати утворення заторових явищ як наслідок переходу режиму руху транспортного потоку від стійкого до нестійкого. Параметри, які визначають перехідні процеси у транспортному потоці, пропонується досліджувати на базі мікромоделей руху транспортного потоку.*

**Ключові слова:** затор, локальна стійкість транспортного потоку, модель слідування за лідером, теорія транспортного потоку, коефіцієнт чутливості.

*Рис 2. Табл 1. Літ 10.*

*В статье предлагается рассматривать возникновение заторовых явлений как следствие перехода режима движения транспортного потока от устойчивого к неустойчивому. Параметры, определяющие переходные процессы в транспортном потоке, предложено исследовать на базе микромоделей движения транспортного потока.*

**Ключевые слова:** затор, локальна устійчивість транспортного потоку, модель слідовання за лідером, теорія транспортного потоку, коефіцієнт чувствительности.

*The article is invited to consider occurrence congestion phenomena as a result of mode transfer of traffic flow from stable to unstable. Some definitions congestion state in terms of modern theory of traffic flow. Noted that the idea of the causes of congestion and ways of avoiding them in the modern theory of traffic flow and practice of organization of traffic varied, however, difficult to implement and not effective enough, and therefore the task of forecasting the occurrence congestion phenomena. Specified activities for the normalization of road transport with regard to foreign experience. It is noted that the original cause of congestion should be analysed at the micro-level interactions of individual cars in traffic flow with the transition to the study of micro characteristic (density, speed, spatial and time interval). The proposed task to solve with the help of simulation based on the model of following the leader. Also suggested for further research model to follow the leader, which takes into account the psycho-physiological indicators of the vehicle driver (response time, the factor of sensitivity and temporal lag) and the technical characteristics of the vehicle. Situations that arise in dense traffic, described with gaps between vehicles and defined the parameters that determine the stability of the regime of traffic flow. Also defined the further directions of research to study the transient process in the traffic flow.*

**Keywords:** congestion, local stability of a traffic flow, model following the leader, traffic flow theory, factor of sensitivity.

Прискорена автомобілізація в умовах відставання розвитку вулично-дорожніх мереж створила проблему не лише в забезпеченні безпеки дорожнього руху, але і в обслуговуванні транспортних та пішохідних потоків на ВДМ міст, що пов'язано із заторами в русі. Затори зумовлені як організаційно-управлінськими причинами: невідповідності режимів світлофорного регулювання інтенсивностям транспортних потоків, незадовільним станом дорожнього покриття, відсутністю розмітки, припаркованими на узбіччях та крайніх правих смугах проїзної частини транспортними засобами, так і ресурсними причинами – потенціал смуги проїзної частини використовується на верхній межі, що особливо характерно для значних та найзначніших міст.

Уявлення про причини виникнення заторів та способи їх попередження в сучасній теорії транспортних потоків та практиці організації дорожнього руху неоднозначні, розроблені моделі мають низку суттєвих обмежень, тому їх складно застосовувати для управління транспортними потоками. В літературі наразі немає єдиного загальноприйнятого визначення поняття «затор». Сучасний науково-популярний словник автомобільних термінів пояснює визначення затору як стан, що відповідає зниженню швидкості транспортного потоку до нуля внаслідок перевищення фактичною інтенсивністю руху пропускної здатності дороги. Словник експерта автотехніка визначає затор як затримку в русі транспортного потоку, що виникає внаслідок різкого зниження пропускної здатності дороги на даній ділянці. Спеціалісти-практики організації дорожнього руху визначають ситуацію на дорозі таким чином: якщо водій протягом одного-трьох циклів СФР може проїхати в будь-якому напрямку перехрестя, то мова про затор не ведеться. Якщо цикл світлофорного регулювання складає 90 секунд і доводиться чекати від 3 до 5 циклів, то це називається передзаторовою ситуацією. І лише провівши перед стоп-лінією більше 7,5 хвилин (п'ять циклів регулювання), водій опиняється в заторовій ситуації.

В практиці організації дорожнього руху затор частіше всього розглядається як негативний фактор бурхливої автомобілізації в умовах дефіциту дорожнього простору. Стійке зростання автомобільного парку, сконцентрованого на відносно невеликих територіях, неминуче призводить до перевантаження ВДМ та періодичного виникнення заторів. Характерні для заторів висока щільність транспортного потоку та низька середня швидкість сполучення, роблять неможливою ефективну роботу транспортних систем.

Таблиця 1

Напрямки роботи по нормалізації транспортної ситуації.

| Напрямки роботи                         | Заходи   | Результат   | Приклади в зарубіжній практиці   |
|---|--|---|--|
| Великомасштабне дорожнє будівництво     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• будівництво систем магістралей швидкісного та безперервного руху;</li> <li>• будівництво багаторівневих розв'язок;</li> <li>• будівництво надземних та підземних пішохідних переходів;</li> <li>• будівництво позавуличних автостоянок та парковок.</li> </ul>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• підвищення пропускної здатності ВДМ;</li> <li>• рішення транспортних проблем міст при високих рівнях автомобілізації (800-1000 авт/1000 чол.)</li> </ul>   | Системи позавуличних швидкісних магістралей, які виконують основну транспортну роботу по зв'язку міста з приміською мережею доріг, і які забезпечують переміщення великих об'ємів перевезень по території міст. Позавуличні мережі приймають на себе 75-80% міського руху, залишаючи на існуючій ВДМ міста міський транспорт загального користування та місцевий рух, які складають на окремих вулицях 10-25%. |
| Обмеження інтенсивності дорожнього руху | <ul style="list-style-type: none"> <li>• обмеження використання особистого автомобіля: тимчасовий та постійний платний в'їзд в певні райони;</li> <li>• платні паркування та стоянка;</li> <li>• повна заборона стоянки;</li> <li>• підвищення попиту на користування міським пасажирським транспортом.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• стабілізація рівня автомобілізації.</li> <li>• зростання швидкості сполучення.</li> <li>• зниження транспортних затримок.</li> <li>• зменшення кількості заторових ділянок.</li> <li>• зменшення кількості ДТП.</li> <li>• зниження екологічних показників роботи транспорту.</li> </ul> | Платний в'їзд в центральну частину міста на особистому автомобілі. Безкоштовне паркування протягом 10 хвилин та поблизу свого помешкання. «Персоналізований» МПТ – маршрутні автоматичні електроавтобуси невеликої пасажиромісткості. Плата за перехоплюючі стоянки являється оплатою проїзду на МПТ.  |

|  |   |  |  |
|--|---|--|--|
| <p>Оптимізація використання існуючої ВДМ</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• перепланування перехрестя та транспортних розв'язок;</li> <li>• організація одностороннього та реверсивного руху;</li> <li>• вибір оптимальних схем та алгоритмів світлофорного регулювання;</li> <li>• впровадження АСУР;</li> <li>• розробка та впровадження ІТС.</li> </ul> | <p>Підвищення пропускної здатності ВДМ на 20-30%.<br/>При впровадженні АСУР та ІТС:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• підвищення пропускної здатності ВДМ на 30-35%;</li> <li>• зменшення транспортних затримок на 20-40%;</li> <li>• зменшення рівня ДТП на 30-40%;</li> <li>• зменшення забруднення навколишнього середовища та рівня шуму, рівня загазованості на 20-30%.</li> </ul> | <p>Імітаційне моделювання при виборі оптимальних схем управління дорожнім рухом. Використання інтелектуальних транспортних систем.</p> |
|--|---|--|--|

Постійне виникнення заторів в русі викликає, крім того, нервові напруження водіїв і пасажирів, що несприятливо позначається на стані аварійності. Слід зазначити, що тяжкість наслідків таких ДТП як правило незначна через невисокі швидкості руху в заторах.

Дослідники вважають, що початок заторового стану виникає, коли потенціал пропускної здатності смуги, дороги, перехрестя і в цілому ВДМ використаний. Незначне перевищення їх пропускної здатності створює початок заторового стану. Затор – це, по суті, колапс ВДМ або її частини. При цьому, масштабні затори розсмоктуються досить повільно, оскільки пропускна здатність ВДМ самим же затором і обмежена.

Заторові стани, що часто виникають, довго тривають та займають значний простір, як правило є наслідком загальної нерозвиненості ВДМ в цілому. Боротьба з ними потребує комплексних мір, що повинні застосовуватися не лише в місцях виникнення заторів, а й на дорожній мережі району, магістралі або населеного пункту. В результаті досліджень були складені комплексні напрямки дій щодо нормалізації дорожньо-транспортної ситуації, наведені в табл.1.

Відомі технології, що конкретно спрямовані на виявлення і попередження заторових ситуацій. Одна із таких технологій розроблена та використовується в м. Хельсинки. Суть проекту полягає у використанні керованих знаків обмеження швидкості та спеціалізованих інформаційних табло оповіщення про виникаючі осередки заторів. Створена система може попереджувати водія про виникнення затору, обмежувати регіон, охоплений затором, і оповіщати про приблизний час розсмоктування затору.

Керовані знаки обмеження швидкості призначають швидкості руху на підходах до затору. Керування системою здійснюється як автоматично, так і за командами оператора з координаційного центру. Подібні системи використовуються і в інших містах. Проте існує думка, що ефект від використання таких систем багато в чому залежить від дисциплінованості та відповідальності водіїв.

Дослідники зазначають, що в умовах об'єктивного дефіциту дорожнього простору, організаційно-управлінськими методами затори не можуть бути ліквідовані, а лише перенесені з місця їх локалізації, що частково пом'якшує гостроту проблеми. Лише відповідність розвитку транспортної інфраструктури рівню автомобілізації дозволить вирішити транспортні проблеми міст.

В сучасній теорії транспортних потоків затор розглядається як один із можливих станів транспортного потоку. Класична діаграма транспортного потоку (рис.1) відображує зміну стану однорядного транспортного потоку в залежності від збільшення його інтенсивності та щільності

[6]. Ліва частина кривої (показана суцільною лінією на рис.1) відображає стійкий стан потоку, при якому по мірі збільшення щільності транспортний потік проходить фази вільного, потім – частково зв'язаного, і насамкінець, зв'язаного руху, досягаючи точки максимально можливої інтенсивності, тобто пропускної здатності (точка  $N_{max} = P_a$  на рис.1). В процесі цих змін швидкість потоку падає – вона характеризується тангенсом кута нахилу радіус-вектора, проведеного з точки 0 до будь-якої точки кривої, яка характеризує зміну інтенсивності  $N$ . Відповідні точки  $N_{max} = P_a$  значення щільності та швидкості потоку вважаються оптимальними для даної пропускної здатності ( $q_{opt}$  та  $V_{opt}$ ). При подальшому зростанні щільності (за точкою  $P_a$  перегину кривої) потік стає нестійким (ця ділянка кривої показана пунктирною лінією).

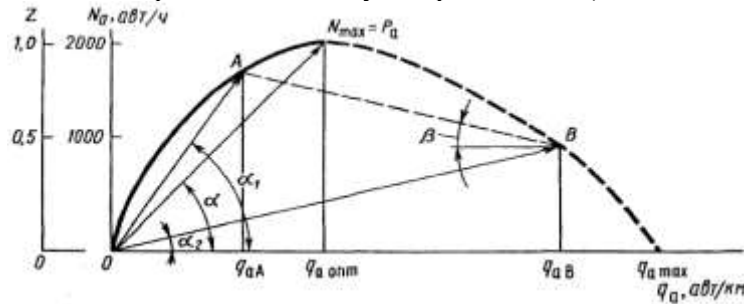


Рис. 1. Основна діаграма транспортного потоку.  
 $Z$  – рівень завантаження дороги рухом

Перехід потоку в нестійкий стан відбувається внаслідок несинхронності дій водіїв для підтримання дистанції безпеки (дії «розгін-гальмування») на будь-якій ділянці шляху і особливо проявляються в несприятливих дорожніх умовах. Все це створює «пульсуючий» (нестійкий) потік.

Різка гальмування потоку в режимі, що відповідає точці  $A$ , і перехід його в результаті гальмувань до стану, що відповідає точці  $B$ , викликає так звану «ударну хвилю» (показана пунктиром  $AB$ ), яка розповсюджується назустріч напрямку потоку зі швидкістю, що характеризується тангенсом кута  $\beta$ . «Ударна хвиля» є також джерелом виникнення супутніх ланцюгових зіткнень, типових для щільних транспортних потоків, внаслідок порушень дистанції безпеки певними водіями.

В точках  $0$  і  $q_{max}$  інтенсивність руху  $N=0$ , тобто, відповідно, на дорозі відсутні транспортні засоби, або потік знаходиться в стані затору (нерухомості).

Радіус-вектор, проведений із точки  $0$  у напрямку будь-якої точки на кривій (наприклад,  $A$  або  $B$ ), що характеризує  $N$ , визначає значення середньої швидкості потоку  $V=N/q=tg\alpha$ .

На графіку (рис.1) показані для прикладу дві точки, характерні:

$A$  – для стійкого режиму руху транспортного потоку;

$B$  – для нестійкого, наближеного до передзаторового стану, потоку.

Кут нахилу радіус-вектора в першій точці  $\alpha_1 = 60^\circ$  ( $tg\alpha = 1,77$ ), а в другій точці  $\alpha_2 = 15^\circ$  ( $tg\alpha = 0,26$ ). Швидкість в точці  $B$  ( $\approx 9,9$  км/год) менша, ніж в точці  $A$  ( $\approx 67$  км/год) в 6,8 раз.

Проте, слід відмітити, що основна діаграма не може відобразити всю складність процесів, що відбуваються в транспортному потоці, та надійно його характеризує лише при однорідному складі та нормальному стані дороги та навколишнього середовища [8]. При зміні стану покриття, умов видимості для водіїв, складу потоку, вертикального та горизонтального профілів дороги змінюється характер діаграми.

З вищевикладеного можна зробити висновок, що в транспортному потоці можуть розглядатися два стійких стани – статичний (зупинка потоку) і динамічний (режим вільного руху). Аналіз стійкості об'єкту може бути проведений шляхом дослідження зміни режиму руху під впливом нормованих збуджуючих факторів. Наразі йдеться про перехідні процеси в транспортному потоці, при цьому відомо, що перехідний процес в потоці при його детермінованості однозначно констатує стійкість явища.

В теорії транспортних потоків об'єкт прийнято вподоблювати потоку рідини або газу. Тому існує поняття фазового переходу у транспортному потоці по аналогії з фазовими переходами у рідині – перетворення пари у воду або води у кригу. Істотно, що розуміння і пояснень моменту і динаміки зміни фаз в транспортному потоці за аналогією з тим, як це відбувається у рідині, на сьогодні поки що бракує. Фазові переходи – це якісні скачкоподібні зміни у швидкості і

щільності транспортного потоку [9]. Ці зміни виникають локально (причини) і розповсюджуються хвилеподібно вздовж потоку (розвиток). Такий стан може зберігатися достатньо довго (існування), годину або дві. Це явище не описується жодною з існуючих математичних моделей – механізм фазових переходів, якщо вони існують в реальності, досі наразі незрозумілий [9].

Ключовим питанням дослідження заторових явищ є визначення фізичних першопричин утворення заторів, їх класифікації та прогнозування, хоча логічно стверджувати, що у будь-якому випадку це певне випадкове або детерміноване збурення, що впливає врешті на окремого водія, а далі – транслюється на решту через ланцюг взаємозв'язків, як у роботі [1]. Кожному водію в потоці доводиться передбачати дії своїх колег, але оскільки інформація від одного автомобіліста до іншого наразі передається тільки за допомогою стоп-сигналів і сигналів поворотів, цього виявляється недостатньо. При цьому навіть один водій, різко загальмувавши, може зупинити весь потік. І оскільки жоден водій не має в своєму розпорядженні інтегральної картини ситуації (інформаційна ентропія), його рішення позбавлені системності. Неможливість цілеспрямованої координації дій учасників дорожнього руху - ще одна з причин «старт-стопних» («stop and go») режимів в умовах дорожнього затору.

Тим не менше, з викладеного витікає, що фазові переходи виникають локально, тобто на мікро-рівні в результаті взаємодій по каналу "перешкода – автомобіль" або ж "автомобіль – автомобіль", а розповсюджується вздовж потоку, як зміни щільності (просторового інтервалу) - стиснення вже у макро-уявленні, причому у вигляді поздовжньої хвилі або кількох хвиль. На базі цього спостереження зрозуміло, що причина фазового переходу - це збільшення завантаження рухом, зменшення середнього просторового інтервалу  $i$ , як наслідок – різке падіння швидкості транспортних засобів.

Які саме параметри визначають фазові переходи? Наприклад для поняття агрегатний стан речовини визначним параметром є температура. Для гідродинамічних переходів – швидкість потоку та ін. Для транспортних потоків це питання остається відкритим і складає подальшу перспективу наукових досліджень в цьому напрямку.

Авторами свого часу була висунута ідея вирішення задачі за допомогою аналізу стійкості об'єкту [5] як ключового прийому теорії автоматичного управління; при цьому під стійкістю (об'єкту, системи, процесу) розуміється властивість повертатися в урівноважений початковий стан після впливу нормованих збурень на вході об'єкту. Такий тезис спрямовує дослідження у бік аналізу перехідних процесів у транспортних потоках, що може бути виконаний шляхом розв'язання системи диференціальних рівнянь, при умові їх наявності, і подальшого аналітичного дослідження передаточної функції отриманої системи.

Складність полягає у тому, що властивості транспортного потоку як об'єкту управління є доволі специфічними, навіть парадоксальними. Так наприклад, природно, що першопричину затору слід аналізувати на мікро-рівні взаємодій окремих автомобілів у потоці (система "водій – автомобіль – дорога" ), але саме явище трансформується далі у меза-рівень (група автомобілів) і врешті надбає характеру макро-рівня (система "дорожні умови – транспортні потоки"), тобто того, що здебільшого і розуміється під затором – "пробкою". Це зокрема означає, що дослідження походження – першопричини заторових явищ повинно базуватися на мікро-моделях, що описують взаємодію двох послідовних автомобілів у потоці з подальшим інтегруванням по довжині (ланцюг взаємодій) і переході до макро-уявлень (щільності, інтервалу, середньої швидкості, тощо). Такі задачі звичайно розв'язують за допомогою імітаційного моделювання, наприклад на основі моделей слідування за лідером [4].

В теорії слідування за лідером [3] розглядається залежність між двома послідовними автомобілями, виходячи з умови, що водій заднього (веденого) автомобіля буде прагнути, щоб відносна швидкість між автомобілями не змінювалась. Відповідно, для дотримання цієї умови, водій заднього автомобіля повинен реагувати на кожну зміну швидкості автомобіля-лідера з врахуванням величини своєї затримки, через яку настає реакція на рух автомобіля-лідера:

$$a_{n+1}(t + \tau) = \frac{K}{x_{n+1}(t) - x_n(t)} (V_n(t) - V_{n+1}(t)) \quad (1)$$

де  $a_{n+1}(t + \tau)$  - значення прискорення веденого автомобіля з врахуванням затримки на реакцію водія веденого автомобіля;

$x_{n+1}(t) - x_n(t)$  - відстань між автомобілями в момент зміни швидкості автомобіля-лідера;

$V_n(t) - V_{n+1}(t)$  - різниця швидкостей між автомобілями у момент зміни швидкості автомобіля-лідера;

$K$  - коефіцієнт пропорційності, що має розмірність швидкості;

$\tau$  - час запізнення, або різниця у часі між сприйняттям про зміну швидкості автомобіля-лідера і реагуванням на цю зміну водієм наступного автомобіля.

Ця залежність показує, що зміна режиму руху веденого автомобіля буде відбуватися у момент часу, який пройде після затримки водія веденого автомобіля на розуміння того, що автомобіль-лідер змінив свій режим руху. Величина, на яку водій веденого автомобіля змінить свою швидкість, залежить від різниці швидкостей автомобілів у момент зміни швидкості водієм автомобіля-лідера, та від відстані між автомобілями.

Відношення  $\frac{K}{x_{n+1}(t) - x_n(t)}$  в літературі [2, 10] називають коефіцієнтом чутливості  $\lambda$ , який

враховує сприйняття водієм веденого автомобіля поведінки автомобіля-лідера, або інші стимули.

Модель лінійної стійкості в літературі [7] поділяється на стійкість:

- локальну,
- асимптотичну.

Локальна стійкість транспортного потоку виражає реакцію веденого транспортного засобу, на поведінку транспортного засобу, що їде перед ним.

Асимптотична стійкість виражає зміну руху ведучого транспортного засобу вздовж дороги і ліміту його стійкості, доти, поки ця стійкість не зникне.

При аналізі рівняння (1) було встановлено, що інтервали між послідовними транспортними засобами коливаються в залежності від величини постійної  $C$ , що визначається як:

$$C = \lambda \cdot \tau \quad (2)$$

В поведінці транспортних засобів можуть виникнути наступні ситуації в транспортних потоках (описані через інтервали між транспортними засобами):

- а) якщо  $\tilde{N} > \frac{\pi}{2}$  ( $\approx 1,57$ )- інтервали між автомобілями коливаються зі зростаючою амплітудою;
- б)  $\tilde{N} = \frac{\pi}{2}$  — відстань між автомобілями змінюється з постійною амплітудою;
- в)  $\frac{1}{e} \cdot (\approx 0,368) < C < \frac{\pi}{2}$  - відстань між автомобілями змінюється, але амплітуда коливань поступово зменшується, і згодом затухає повністю;
- г)  $C = \lambda T < \frac{1}{e}$  - порушення в системі припиняються досить швидко.

Графічне зображення виникнення цих інтервалів між транспортними засобами ілюструється рис. 2.

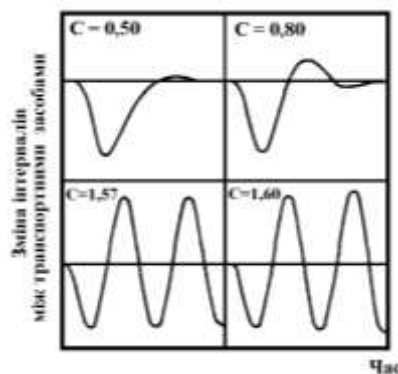


Рис. 2. Коливання інтервалів транспортних засобів в часі

Асимптотична стійкість показує стійкість колони транспортних засобів з урахуванням флуктуації в русі першого транспортного засобу. Швидкість, з якою поширюється флуктуація руху першого транспортного засобу, складає  $1/\lambda$ .

Проте в теоретичних розрахунках асимптотичної стійкості коефіцієнт чутливості та значення параметру запізнення приймалися як середні та для сталих умов стимул-реакції, в той час як фактично водію кожного автомобіля в потоці властиві індивідуальні значення цих параметрів, і, як наслідок, різні значення  $C$ . Іншими словами, водії з низьким значенням  $C$  будуть часто згладжувати реакцію водіїв з високими значеннями  $C$ , і завдяки цьому запобігатимуть підсиленню порушень просторових інтервалів між автомобілями.

Відомо, що перехід від нормального руху до затору є гістерезисним за своєю природою, тобто зворотний перехід відбувається при менших щільностях і більших швидкостях потоку. З цього витікає, що значно легше запобігти утворенню затору, ніж надалі його ліквідувати. З цієї причини виникає задача прогнозування заторів, що може розв'язуватись лише з позицій адекватного моделювання динаміки транспортних потоків.

Таким чином, на основі вищевикладеного можна сформулювати напрямки подальших досліджень:

- створення імітаційної моделі транспортного потоку на базі мікромоделей слідування за лідером;
- експериментальне визначення умов утворення затору;
- аналіз фазових переходів для подальшої оцінки стійкості транспортного потоку;
- визначення параметрів, що визначають перехідні процеси у транспортному потоці.

1. Barwell F.T. Automation and Control in Transport.: Oxford publ., 1983. – 367 p.
2. Вол М. Анализ транспортных систем: пер. с англ./ Вол М., Мартин Б. – М. Транспорт, 1981. – 516 с.
3. Врубель Ю.А. Характеристики дорожного движения. – Минск.: БНТУ, 2007. – 268 с.
4. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. – М.: Транспорт, 1972. – 562 с.
5. Сресов В.І. До питання щодо хвильової поведінки і стійкості транспортних потоків./ Сб. "Автомобильный транспорт", Вып. 13, изд. ХНАДТУ, Харьков, 2003, с.309-311.
6. Клишковштейн Г.И. Организация дорожного движения: учеб. [для вузов]/ Клишковштейн Г.И., Афанасьев М.Б. – М.: Транспорт, 2001. – 335 с.
7. Поліщук В.П. Теорія транспортного потоку: методи та моделі організації дорожнього руху: навч. посіб./ Поліщук В.П., Дзюба О.П. – К.: Знання України, 2008. – 175 с.
8. Ренкин В.У. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения: Справочник. Пер. с англ./ Ренкин В.У., Клаффи П., Халберт С. и др. – М.: Транспорт, 1981. – 592 с.
9. Семенов В.В. Математическое моделирование транспортных потоков мегаполиса. – Препринт №34 Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2004. – 35 с.
10. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – М.: Транспорт, 1984. – 287 с.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2014