

УДК 656.13

І.О.Павлова, І.С.Мурований

Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДОВИХ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ НА ВУЛИЧНО-ДОРОЖНІЙ МЕРЕЖІ МІСТА

В роботі проаналізовано показники, що використовуються для дослідження транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міста, визначено взаємозв'язок між характеристиками транспортного потоку. Проведено аналіз існуючих моделей транспортного потоку.

Ключові слова: *транспортний потік, інтенсивність, швидкість, затор, математична модель.*

Постановка проблеми.

На сьогоднішній день транспорт є однією з найважливіших галузей матеріального виробництва України. Транспорт – це засіб забезпечення територіальних зв'язків; крупний споживач трудових і матеріальних ресурсів; чинник, що визначає ефективність розвитку і розміщення продуктивних сил в різних регіонах країни; засіб впливу на соціальну і економічну структуру самого суспільства; чинник, що грає важливу роль в рішенні зовнішньополітичних задач і впливає на взаємини між окремими організаціями; засіб мобільності, що забезпечує матеріальний і культурний рівень життя людини

Він є важливим чинником формування територіальної структури господарства. Вплив транспортного чинника залежить від рівня розвитку транспортної системи. Чим більш розвинутою, різноманітною й розгалуженою є транспортна мережа, чим більше функціонує ефективних транспортних засобів, тим сприятливішим є транспортне положення об'єкта території (району, міста). А недостатній розвиток транспортної системи обмежує можливості формування і подальший розвиток господарства на певній території.

Мета дослідження. Дослідити елементи транспортного потоку з метою визначення важливості впливу на стан транспортної мережі міста.

Результати досліджень.

Під організацією дорожнього руху (ОДР) в даний час розуміють комплекс інженерно-технічних і організаційних заходів, направлених на забезпечення оптимальної швидкості руху транспортних засобів, безпеки і зручності для всіх учасників руху, забезпечення необхідної пропускної спроможності існуючої вулично-дорожньої мережі.

Основний принцип ОДР - розділення потоків в просторі і в часі. Для розділення *потоків в просторі* служать смуги руху, транспортні розв'язки, пішохідні переходи. *Потоки в часі* розділяються за допомогою дорожньої сигналізації, в першу чергу світлофорної. У ряді випадків розділення потоків забезпечують Правила дорожнього руху.

Умови руху, особливо у великих містах, характеризуються все зростаючою складністю. Висока інтенсивність руху, що збільшується – результат диспропорції між ростом автомобільного парку і мережею автомобільних шляхів, що, у свою чергу, призводить до високої завантаженості транспортної мережі і збільшення рівня аварійності.

Збільшення інтенсивності, зміна структури та швидкісних режимів транспортних потоків висувають усе більші вимоги до засобів керування й організації дорожнього руху, які покликані забезпечити необхідний рівень ефективності і безпеки руху. Вони можуть бути досягнуті за умови своєчасного і повного інформування учасників руху про зміну умов руху, шляхово-транспортних ситуацій, що дозволить вибрати правильний напрямок і безпечний режим руху.

Для забезпечення умов організації дорожнього руху на вулично-дорожній мережі міст необхідно мати інформацію про стан дорожнього руху. В першу чергу необхідно мати дані, що характеризують транспортний потік.

Багаторічний досвід досліджень та практичних спостережень за транспортними потоками дозволили розробити відповідні об'єктивні показники. По мірі удосконалення методів та апаратури для дослідження транспортних потоків номенклатура показників, що використовуються в організації дорожнього руху, продовжує розвиватися. Найбільш необхідні та часто застосовувані є

- інтенсивність транспортного потоку на вулично-дорожній мережі міст;
- склад транспортного потоку за типами транспортних засобів;
- щільність потоку, швидкість та затримки руху.

Отримати такі дані про стан транспортного потоку дозволяє використання різноманітних моделей транспортного потоку.

Інтенсивність транспортного потоку (інтенсивність руху) – кількість транспортних засобів, що проїжджають через переріз дороги за одиницю часу. В якості розрахункового періоду часу для визначення інтенсивності руху приймається рік, місяць, доба, година та більш короткі проміжки часу в залежності від поставленого завдання спостереження та засобів вимірювання.

На вулично-дорожній мережі міст можна виділити окремі ділянки, де рух транспортних засобів досягає максимальних розмірів, в той час коли на інших ділянках він в декілька разів менше. Така просторова нерівномірність відображає передусім нерівномірність розміщення вантажо- та пасажирозбірних пунктів та місць їх притягання.

Нерівномірність транспортних потоків на протязі року, місяця, доби і, навіть, години має важливе значення в питанні організації дорожнього руху. Крива розподілення інтенсивності руху на протязі доби на міській магістралі зображена на рис. 1.

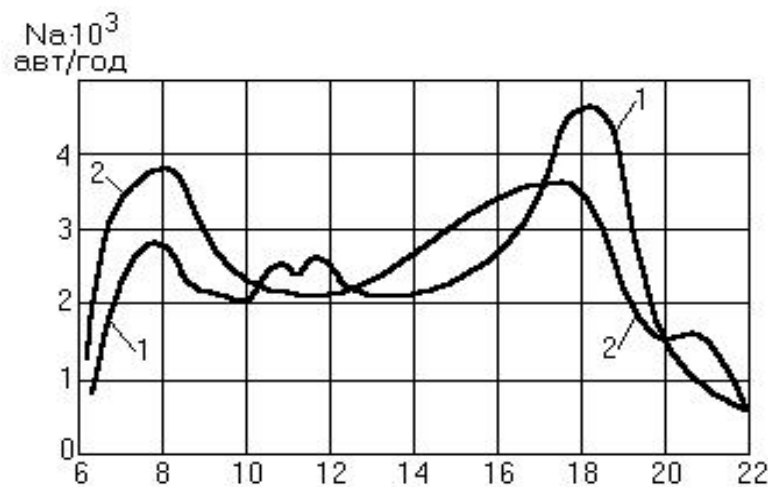


Рис. 1: Зміна інтенсивності транспортного потоку на протязі доби на міській магістралі радіального напрямку: 1 – рух з центра; 2 – рух до центра.

Часова нерівномірність транспортних потоків може бути охарактеризована відповідним коефіцієнтом нерівномірності K_n для річної, добової та годинної нерівномірності руху. Нерівномірність може бути виражена як частка інтенсивності руху, що приходить на даний відрізок часу, або як відношення інтенсивності, що спостерігається до середньої інтенсивності за однакової проміжки часу.

Коефіцієнт річної нерівномірності можна розрахувати за формулою:

$$K_{нр} = 12 N_{ам} / N_{ар}, \quad (1)$$

де 12 – число місяців в році;

$N_{ам}$ – інтенсивність руху за порівнюваний місяць, авт/міс;

$N_{ар}$ – сумарна інтенсивність руху за рік, авт/рік.

Коефіцієнт добової нерівномірності розраховується за формулою:

$$K_{нд} = 24 N_{аг} / N_{ад}, \quad (2)$$

де - 24 число годин в добі;

$N_{аг}$ – інтенсивність руху за порівнювану годину, авт/год;

$N_{ад}$ – сумарна інтенсивність руху за добу, авт/доб.

В деякій літературі з дорожнього руху в наслідок нерівномірності транспортного потоку досить часто використовують поняття об'єм руху на відміну від інтенсивності руху.

Під об'ємом руху розуміється фактичне число автомобілів, що проїжджають по дорозі на протязі прийнятої одиниці часу, отримане безперервним спостереженням за визначений період.

Нерівномірність транспортних потоків проявляється не лише в часі, але й просторі, тобто по довжині дороги та по напрямкам. Для характеристики просторової нерівномірності транспортного потоку можуть бути також визначені відповідні коефіцієнти нерівномірності по окремим вулицям та ділянках доріг.

У багатьох випадках, особливо при вирішенні питань регулювання руху у міських умовах, має значення не тільки сумарна інтенсивність руху потоку по даному напрямку, але також інтенсивність, що приходить на одну смугу, або так названа питома інтенсивність руху M_a . Якщо відоме конкретне розподілення інтенсивності руху по смугам та воно істотно нерівномірне, то в якості розрахункової інтенсивності M_a можна використати інтенсивність руху по найбільш завантаженій смузі руху.

Часовий інтервал t_i між слідуючими один за одним автомобілями є показником, протилежним інтенсивності руху. Математичне очікування $E(t_i)$ визначається залежністю:

$$E(t_i) = 3600/M_a, (3)$$

Якщо інтервал t_i між слідуючими один за одним по смузі автомобілями більш ніж 10 секунд, то їх взаємна дія є відносно слабкою та умови руху характеризуються як "вільні".

Склад транспортного потоку характеризується співвідношенням в ньому транспортних засобів різного типу. Цей показник чинить значний вплив на параметри дорожнього руху. Разом з тим склад транспортного потоку значною мірою відображає загальний склад парку автомобілів в регіоні. Склад транспортного потоку чинить вплив на завантаження вулично-дорожньої мережі, що пояснюється перед усім значною різницею в габаритних розмірах автомобілів.

Для того, щоб урахувати в фактичному складі транспортного потоку вплив різних типів транспортних засобів на завантаження вулично-дорожньої мережі міст, використовуються коефіцієнти приведення $K_{пр}$ до умовного легкового автомобіля.

Для вирішення практичних задач організації дорожнього руху в містах, доцільно використовувати значення $K_{пр}$:

- Легкові автомобілі – 1;
- Мікроавтобуси та вантажні автомобілі вантажопід'ємністю до 2 тон – 1,5;
- Вантажні автомобілі вантажопід'ємністю 2 - 5 тон – 2,0;
- Вантажні автомобілі вантажопід'ємністю 5 - 8 тон – 2,5;
- Вантажні автомобілі вантажопід'ємністю більш ніж 8 тон – 3,5;
- Автобуси усіх марок – 2,5;
- З'єднані автобуси – 3,5;
- Тролейбуси – 3,0;
- З'єднані тролейбуси – 3,5;
- Мотоцикли, мопеди та інше – 0,5;
- Кран, автопоїзди та інше – 3,5.

За допомогою коефіцієнта приведення можна отримати показник інтенсивності руху транспортного потоку в умовних приведених одиницях за наступною залежністю:

$$N_{np} = \sum_i^n (N_i K_{np_i}) , \text{ од/год} \quad (4)$$

де N_i – інтенсивність руху транспортних засобів даного типу, авт/год;

K_{np_i} – відповідні коефіцієнти приведення для конкретної групи транспортних засобів;

n – число типів транспортних засобів на які розділені дані спостережень.

Щільність транспортного потоку q_a є просторовою характеристикою, що визначає ступінь щільності транспортного потоку на смузі руху. Вона вимірюється числом транспортних засобів, що приходить на 1км протяжності дороги. Гранична щільність досягається при нерухомому стані колони автомобілів, що розміщені упритул один до одного на смузі руху.

В залежності від щільності транспортного потоку рух по ступені щільності ділиться на вільний, частково зв'язаний, насичений, колонний.

Чисельні значення q_a в фізичних одиницях, що відповідають цим станам транспортного потоку, дуже істотно залежать від параметрів вулично-дорожньої мережі, коефіцієнта зчеплення, а також стану потоку за типами транспортних засобів, що, в свою чергу, впливає на швидкість, яку обирає водій.

Швидкість руху є важливим показником, так як являє собою цільову функцію дорожнього руху. Найбільш об'єктивною характеристикою транспортного засобу на вулично-дорожній мережі може бути графік зміни його швидкості на протязі всього маршруту руху. Однак, отримання таких просторових характеристик для множини автомобілів що рухаються є складним, так як вимагає безперервного автоматичного запису швидкості на кожному з них. В практиці організації дорожнього руху прийнято оцінювати швидкість руху транспортних засобів миттєвими її значеннями, зафіксованими в окремих типових перетинах дороги.

Затримки руху є показником, на який необхідно звернути особливу увагу при оцінці стану дорожнього руху. До затримок слід віднести втрати часу не лише на всі змушені зупинки транспортних засобів перед перехрестями, залізничними переїздами, при заторах на перегонах, але також через зниження швидкості транспортного потоку у порівнянні з середньою швидкістю вільного руху на даній ділянці вулично-дорожньої мережі.

Втрати часу розраховуються за залежністю:

$$\Delta t = \int_{l_i}^{l_n} [l/V\phi(l) - l/Vp(l)] dl, \quad (5)$$

де $V\phi$ та Vp – відповідно фактична та прийнята розрахункова швидкості, м/с;

dl – елементарна ділянка дороги, м.

Загальні втрати часу для транспортного потоку розраховуються за залежністю:

$$\Delta T = Na \cdot t \Delta T, \quad (6)$$

де Δt - середня сумарна затримка одного автомобіля, с;

T – тривалість спостереження, год;

Na – інтенсивність руху транспортного потоку.

Для загальної оцінки транспортного потоку необхідно визначити взаємозв'язок між характеристиками транспортного потоку.

Однією з перших робіт в даному напрямку є робота Гріншилдса (1934р.). Він встановив лінійну залежність між середньою щільністю та середньою швидкістю (рис. 2), яка має вигляд:

$$\bar{V}_s = \bar{V}_j - \left(\frac{\bar{V}_j}{D_j} \right) D, \quad (7)$$

де \bar{V}_j – середня швидкість вільного руху, км/год;

D_j – щільність транспортного потоку при заторовій ситуації, авт/км.

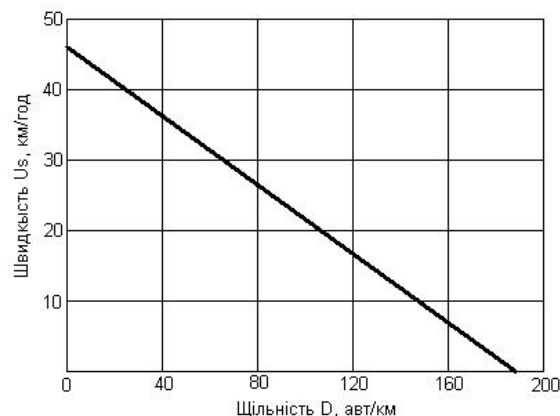


Рис.2 Графік залежності між швидкістю та щільністю транспортного потоку.

Якщо між швидкістю та щільністю транспортного потоку існує лінійний зв'язок, то кореспондуючі функції для інтенсивності та щільності, а також для інтенсивності та швидкості повинні мати параболічну форму. Залежність інтенсивність – щільність може бути отримана шляхом підстановки виразу N/D для V_s у рівність (7). В результаті отримаємо вираз:

$$N = \bar{V}_j D - \frac{\bar{V}_j}{D_j} D^2, \quad (8)$$

Аналогічно, підставляючи вираз N/V_s замість D у рівняння (7), отримаємо залежність між інтенсивністю та швидкістю:

$$N = D_j \bar{V}_s - \frac{D_j}{\bar{V}_j} \bar{V}_s^2, \quad (9)$$

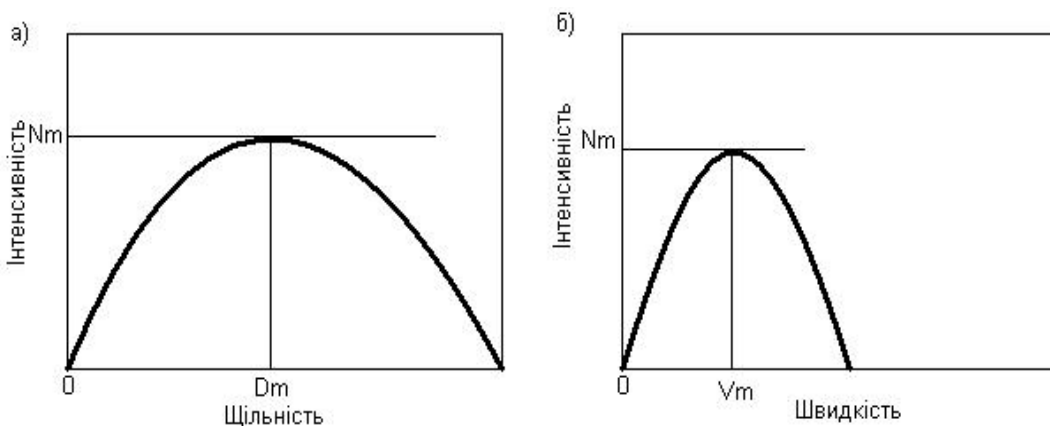


Рис. 3. Параболічні криві: а) інтенсивність – щільність; б) інтенсивність – швидкість.

Однак, в даному випадку транспортний потік розглядається як безперервний процес. Але транспортний потік фактично являє собою послідовність дискретних подій, які полягають в появі автомобілів на ділянці вулично-дорожньої мережі.

При аналізі такого транспортного потоку, виділяються наступні залежності між характеристиками транспортного потоку:

- залежність між швидкістю руху автомобілів у потоці, відстанню між сусідніми, слідуючими один за одним автомобілями у потоці та часовим інтервалом між сусідніми, слідуючими один за одним автомобілями у потоці:

$$V = \Delta S / t_i, \quad (10)$$

де V – швидкість руху автомобілів у потоці, м/сек;

ΔS – відстань між сусідніми, слідуючими один за одним автомобілями у потоці, м;

t_i – часовий інтервал між сусідніми, слідуючими один за одним автомобілями у потоці, сек.

- залежність між швидкістю руху автомобілів у потоці, щільністю та інтенсивністю транспортного потоку:

$$V = N / D, \quad (11)$$

де N – інтенсивність руху автомобілів у потоці, од/сек.;

D – щільність транспортного потоку, од/м.

Таким чином, загальне рівняння транспортного потоку буде мати вигляд:

$$\bar{N} = \bar{D} \cdot \bar{V}, \quad (12)$$

При аналізі основного рівняння транспортного потоку доцільно розглянути поверхню, що утворюється при графічній побудові рівняння на взаємно перпендикулярних осях (рис.4)

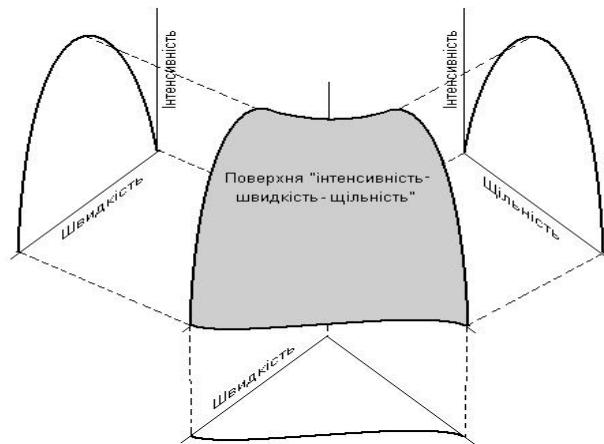


Рис. 4. Об'ємна діаграма для інтенсивності, швидкості та щільності транспортного потоку

Також загальне рівняння транспортного потоку в повній мірі описується основною діаграмою транспортного потоку, яка має вигляд (рис.5):

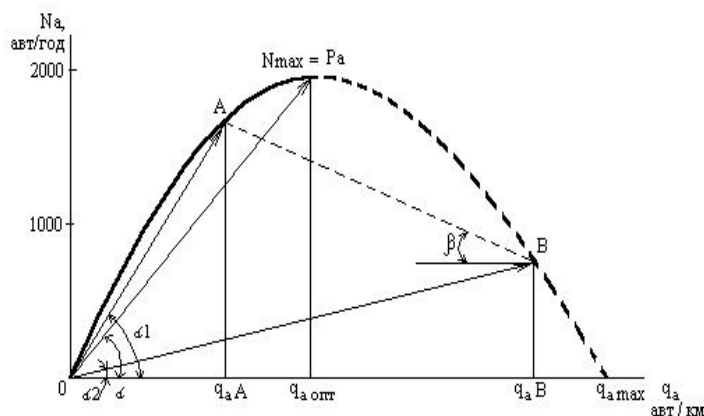


Рис. 5. Основна діаграма транспортного потоку.

Основна діаграма відображає зміну однорідного транспортного потоку переважно легкових автомобілів в залежності від збільшення його інтенсивності та щільності. Ліва частина кривої (на рис.5 зображена суцільною лінією) відображає стійкий стан транспортного потоку, при якому по мірі зростання щільності транспортний потік проходить фази вільного, потім частково зв'язаного на потім зв'язаного руху, досягаючи точки максимально можливої інтенсивності, тобто пропускної здатності. В процесі цих замірів швидкість потоку знижується – вона характеризується тангенсом кута нахилу α радіуса-вектора, проведеного від точки 0 до будь-якої точки кривої, що характеризує зміну інтенсивності. Відповідно точки $N_{a max} = Pa$ значення щільності та швидкості потоку вважаються оптимальними по пропускній здатності. При подальшому зростанні щільності потік стає нестійким (на рис.5 зображено пунктирною кривою).

Однак, основна діаграма не може відобразити всю складність процесів, що відбуваються в транспортному потоці та характеризує його лише при однорідному складі та відповідному умовам руху стані ділянок вулично-дорожньої мережі міста та зовнішнього середовища.

Для вирішення проблем організації дорожнього руху на вулично-дорожній мережі міста необхідно передбачити поведінку транспортного потоку на вулично-дорожній мережі міста. Для вирішення даної задачі використовується моделювання зміни параметрів транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міста.

Виходячи з усього вище наведеного видно, що між характеристиками транспортного потоку існує безпосередній зв'язок, а, отже, знаючи один з основних параметрів потоку, можна визначити й інші параметри. Тому доречно провести моделювання зміни інтенсивності транспортного потоку на вулично-дорожній мережі міста.

Широкого розповсюдження в теорії транспортного потоку отримали аналогові, символічна та математичні моделі.

Математичні моделі, що знайшли широкого розповсюдження в організації дорожнього руху можна розділити на дві групи в залежності від підходу: детерміновані та ймовірнісні (стахостичні).

До детермінованих відносяться моделі, в основі яких лежить функціональна залежність між окремими показниками. При цьому вважається, що всі автомобілі віддалені один від одного на однакову відстань (рівномірний транспортний потік).

Стахостичні моделі відрізняються більшою об'єктивністю. В них процеси у транспортному потоці вважаються ймовірнісний (випадковий).

Найпростішою математичною моделлю, що описує потік автомобілів, є так названа спрощена динамічна модель. Її застосовують для визначення максимально можливої інтенсивності руху по одній смузі ділянки вулично-дорожньої мережі при заданій швидкості. У математичному вираженні дана модель має вигляд:

$$N_{a \max} = AV_a/L_d, \quad (13)$$

де $N_{a \max}$ – максимально можлива інтенсивність руху по одній смузі ділянки вулично-дорожньої мережі, авт/год;

A – коефіцієнт розміності;

V_a – швидкість руху автомобіля у потоці, км/год;

L_d – динамічний габарит автомобіля, м.

При вираженні швидкості автомобіля у потоці в кілометрах за годину, а динамічного габариту в метрах, формула (13) є виразом для визначення пропускної здатності смуги:

$$P_n = 1000 V_a/L_d, \quad (14)$$

де P_n – пропускна здатність смуги руху, авт/год.

Дана математична модель складена на основі двох припущень: швидкість усіх транспортних засобів у потоці однакова, транспортні засоби є однотипними, тобто мають однакові динамічні габарити. Динамічний габарит транспортного засобу визначається як сума довжини транспортного засобу, дистанції безпеки та зазору до автомобіля, що зупинився попереду. Розрахунок динамічного габариту транспортного засобу виконується за наступним виразом:

$$L_d = l_a + d + l_0, \quad (15)$$

де l_a – габаритна довжина автомобіля, м;

d – дистанція безпеки, м;

l_0 – зазор до автомобіля, що зупинився попереду, м.

У результаті вивчення транспортних потоків високої щільності та спеціальних експериментів була запропонована теорія "слідування за лідером", математичним вираженням якої є мікроскопічна модель транспортного потоку. Мікроскопічною її називають тому, що вона розглядає елемент потоку – пару слідуючих один за одним автомобілів.

До моделей, що розглядають транспортний потік в цілому (макроскопічні моделі) відносять, наприклад, моделі гідродинамічної теорії. Ці моделі засновані на дослідженні аналогії в поведінці транспортного потоку та потоку рідини. Одна з таких моделей, наприклад, заснована на рівнянні нерозривності, яке обумовлює постійність кількості рідини при її протіканні по водотоку. В позначеннях, прийнятих для транспортного потоку, та в результаті перетворень та спрощень, інтенсивність транспортного потоку виражається залежністю:

$$N_a = V_a \cdot q_a \cdot \ln(q_{a \max}/q_a), \quad (16)$$

де N_a – інтенсивність транспортного потоку на вулично-дорожній мережі міста, авт/год;

V_a – швидкість руху транспортного потоку на вулично-дорожній мережі міста, км/год;

q_a – щільність транспортного потоку, авт/км;

$q_{a \max}$ – максимальна щільність транспортного потоку на вулично-дорожній мережі міста (при заторовій ситуації), авт/км.

Другим прикладом гідродинамічних моделей є модель, яка використовує відоме з гідравліки поняття про потенціал тиску рідини та допускає, що рух автомобіля виражається у вигляді функції деякого потенціалу тиску, що залежить від дорожніх умов та психофізичного стану водія.

Недоліком даного виду моделей є те, що отримані за їх допомогою дані не є достовірними, а тому вони не можуть використовуватись для описання поведінки транспортного потоку на вулично-дорожній мережі міста при розробці та впровадженні схем організації дорожнього руху у містах.

Для вирішення задач організації дорожнього руху необхідно мати стахостичні характеристики параметрів транспортного потоку на ділянках вулично-дорожньої мережі міст. Дослідженнями встановлено, що для описання транспортних потоків відносно малої інтенсивності, що характеризує вірогідність проїзду певного числа транспортних засобів через переріз дороги, застосовується рівняння (розподілення) Пуассона, яке має вигляд:

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}, \quad (17)$$

де $P_n(t)$ – вірогідність проїзду n -го числа автомобілів за час t ;

λ - зупинковий параметр розподілення (інтенсивність транспортного потоку), авт/сек;

t – протяжність періодів спостереження, с;

n – кількість автомобілів, що спостерігається.

Дана модель дає подібність з натуральними спостереженнями для однорідних потоків, головним чином таких, що складаються з легкових автомобілів. При змішаному потоці, а також при дії певних зовнішніх факторів, розподілення Пуассона не дає задовільних результатів.

Висновки

Таким чином, було виконано дослідження параметрів транспортного потоку, а також визначено залежності між даними параметрами. Було проведено дослідження та аналіз існуючих моделей транспортного потоку. Визначено, що детерміновані моделі не дають оптимальної точності розрахунків, а моделі стахостичні дають більш чіткі результати при їх використанні.

1. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими / Д.Дрю. - М.: Транспорт, 1972. – 424 с.
2. Вол М., Мартин Б. Анализ транспортных систем / Пер. с англ. – М.: Транспорт, 1987. – 287 с.
3. Клиновштейн Г.И., Сытник В.Н. Методы оценки качества организации дорожного движения / М.:Транспорт, 1987. – 250 с.
4. Клиновштейн Г.И., Афанасьев М.Б. Организация дорожного движения / Издание четвертое, перераб. и дополн. – М.: Транспорт, 1981. – 340 с.