

Мурований І.С., Онищук В.П.  
*Луцький національний технічний університет*

## МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ І ПАСАЖИРСЬКИХ ПОТОКІВ

Головна проблема, з якою стикається сьогодні автомобільний транспорт в місті, - це транспортні пробки, які виникають по ряду причин. Однією з головних причин транспортних заторів є зростання автомобільного транспорту, що супроводжується збільшенням інтенсивності руху на вулично-дорожній мережі (ВДМ) міста. Це відбувається внаслідок того, що інфраструктура міста не встигає розвиватися з такою ж інтенсивністю, з якою росте кількість автомобілів. Для вироблення рішення даної проблеми застосовують методи математичних моделювання. Математичні моделі дозволяють імітувати існуючу дорожню ситуацію, а також прогнозувати можливі варіанти її розвитку в залежності від різних факторів. З метою опису властивостей математичних моделей, що застосовуються для вивчення транспортних потоків, запропоновано класифікацію моделей і їх особливості.

**Ключові слова:** транспорт, транспортна система міста, моделювання, транспортні потоки, пасажирські потоки.

На сьогоднішній день транспортна інфраструктура є однією з найбільш важливих складових, що забезпечують життя міст і регіонів. Це насамперед проявилось у швидкому зростанні кількості індивідуальних транспортних засобів у великих і значних містах, що, своєю чергою, породило низку транспортних проблем, зокрема таких як перевантаження вулиць транспортом, збільшення витрат часу на поїздки та кількості вимушених зупинок, зростання аварійних ситуацій і дорожньо-транспортних пригод, виникнення заторів тощо. Аналізуючи ситуацію, що склалася за останні роки, можна стверджувати, що збільшення кількості транспортних засобів (ТЗ) в Україні буде продовжуватись, не зважаючи на зменшення чисельності населення.

Для вирішення даних проблем потрібні значні фінансові витрати на проведення робіт з оптимізації транспортної мережі та її подальшої трансформації у високо керовану логістичну систему. При інвестуванні необхідно враховувати закономірності розвитку транспортної мережі, так як їх ігнорування згодом стає причиною утворення транспортних заторів, перевантаженості або, навпаки, недостатньою завантаженості окремих ліній і вузлів мережі, а також підвищення рівня аварійності та екологічного збитку.

Одним з основних інструментів вирішення проблеми є використання математичного моделювання. Моделювання транспортних потоків є ефективним засобом вдосконалення та оптимізації транспортних систем та підвищення якості транспортного обслуговування. З теоретичного та практичного погляду актуальність моделювання транспортних потоків пасажирів і вантажів настільки актуальна, що цьому питанню присвячена величезна кількість публікацій у світовій літературі. На сьогодні існує велика кількість методик, які з достатньою точністю дають змогу моделювати транспортні потоки. [1-5].

**Викладання основного матеріалу.** В процесі пошуку ефективних стратегій управління транспортними потоками в місті і створення сучасних проектних рішень необхідно враховувати вплив зовнішніх і внутрішніх факторів на динамічні характеристики змішаного транспортного потоку. Транспортний потік складається з окремих пересувань, які здійснюють учасники руху. Основними характеристиками транспортного потоку, що описують його кількість і якість є:

- інтенсивність руху;
- склад транспортного руху;
- швидкість руху;
- щільність потоку;
- інтервал (часовий) слідування;
- дистанція між транспортними засобами.

Однією з основних характеристик транспортного потоку є інтенсивність руху. Розподіл інтенсивності руху в часі є важливим показником щодо формування транспортних потоків на вулицях і дорогах. Інтенсивність руху – це кількість автомобілів, що проходить за одиницю часу через перетин дороги в певному напрямі. Інтенсивність може змінюватися від 0 до максимального значення  $N_{\max}$  – до рівня пропускної спроможності. Ці ознаки дозволяють говорити про транспортний потік як про систему, складну для формалізації. Для систематизованої формалізації вхідних даних такої моделі потрібно створити та описати цілу низку необхідних і важливих характеристик

функціонування транспортної системи [6]. Багато характеристик транспортного потоку неможливо виразити в абсолютних величинах, також не завжди можливо провести масштабні натурні випробування. Тому для дослідження змін, що впливають на характеристики транспортних потоків, і оцінки якості управління рухом використовують математичне моделювання транспортних мереж. Це дозволяє імітувати і вивчити ресурси транспортного потоку протягом короткого часу і без істотних витрат.

Моделювання транспортних потоків та планування транспорту відносяться до більш широкого поля моделювання трафіку. Однак існують важливі відмінності між моделюванням транспортних потоків та плануванням транспорту:

– тимчасовий аспект: часовий інтервал в динаміці руху транспортних засобів становить від декількох хвилин до декількох годин, а планування транспорту охоплює періоди від годин до декількох днів чи навіть років.

– об'єктивний аспект: потокова динаміка трафіку передбачає зовнішній заданий трафік та фіксовану інфраструктуру. Моделі моделювання транспорту динаміку попиту на трафік та ефектів зміни інфраструктури.

– суб'єктивний аспект: потокова динаміка трафіку аналізує людську (або автоматичну) оперативну поведінку водія (прискорення, гальмування, зміна смуги, поворот), тоді як вищі рівні дії, наприклад, вибір активності (кількість та тип поїздок), вибір місця призначення, вибір режиму та вибір маршруту належить до сфери планування транспорту.

Основною метою створення математичних моделей транспортних потоків є визначення та прогноз всіх параметрів функціонування транспортної мережі – інтенсивності руху, обсягів пасажирських перевезень, середніх швидкостей руху, затримок і втрат часу і т.д. Для моделювання та аналізу транспортної мережі застосовуються різні математичні моделі, які відрізняються між собою за напрямками вирішення поставлених завдань, математичного апарату, що застосовується цією і точності опису транспортних процесів.

З урахуванням функціональної ролі математичні моделі можна розділити на дві об'ємні групи:

I) прогнознi моделі;

II) імітаційні моделі.

Прогнозне і імітаційне моделювання - це два взаємодоповнюючих напрямки, метою яких є відтворення транспортних потоків відповідно до дійсності. Створювані моделі транспортних потоків згодом застосовуються для вирішення завдань, пов'язаних з підвищенням ефективності пасажирських і вантажних перевезень і зміною конфігурації мережі.

I). Прогнозні моделі дозволяють за геометричними характеристиками транспортної мережі та розміщення об'єктів тяжіння визначити, якими будуть транспортні потоки в цій мережі. Прогноз завантаженості транспортної мережі в першу чергу передбачає розрахунок усереднених характеристик руху, таких як інтенсивність транспортного потоку, обсяг міжрайонних кореспонденцій, розподіл автомобілів та пасажирів по шляхах руху. Прогнозні моделі поділяються на кілька груп

1. *Моделі розрахунку матриці кореспонденцій між районами:*

– гравітаційна модель. Розроблена за аналогією з ньютонівським законом, який пов'язує силу тяжіння  $F_{ij}$  між двома масами  $m_i$  і  $m_j$ , розташованими один від одного на відстані  $d_{ij}$

$$F = \zeta \frac{m_i m_j}{d_{ij}^2},$$

де  $\zeta$  - деяка константа.

Аналогічно закону Ньютона, транспортна гравітаційна модель пов'язує інтенсивність потоку  $T_{ij}$  між повним числом відправлення з  $i$  зони  $Q_i$  і прибутті в  $j$  зону  $D_j$  і витратами на пересування між зонами  $i$  і  $j$   $c_{ij}$ .

$$T_{ij} = k \frac{Q_i D_j}{c_{ij}^2}, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, M,$$

де  $N$  - загальна кількість зон відправлення,  $M$  - загальна кількість зон прибуття,  $k$  - деяка константа, а витрати на пересування виступають в якості "відстані". Величина  $c_{ij}$  - може бути розглянута як відстань між двома зонами  $i$  і  $j$ , або як вартість проходження відстані між даними зонами. При складанні матриці кореспонденцій транспортний відстань виражається узагальненої

ціною шляху між двома районами, тобто величиною матеріальних і тимчасових витрат на рух по шляху. Перевагою цього методу є можливість врахування впливу різних чинників (особливостей населення, організації руху та ін.). Однак у цього способу є недолік – якщо обсяг кореспонденцій збільшиться, наприклад, в два рази, то розрахункова кореспонденція збільшиться в чотири рази, що не є достовірним. Також сполучення між двома розглянутими районами розраховується окремо від інших районів, особливості кореспонденції яких можуть вплинути на розрахунки;

– модель конкуруючих центрів. Вона являє собою узагальнення гравітаційної моделі, так як включає в себе додаткові коригувальні фактори - індекс відвідуваності району, ранжування районів;

– ентропійна модель. Суть цього принципу полягає в тому, що реального розподілу потоку на мережі, які генеруються в результаті самоорганізації, ставиться у відповідність розподіл потоків (які задовольняють транспортним обмеженням), яке може бути отримано в результаті максимізації деякої ентропійної функції, яка параметрично залежить від стану системи, апіорі бажаного для всіх її елементів (зважена ентропія). Прикладом перших моделей цього напрямку може служити модель [3]:

$$\min \left( \sum_{T_{ij}} \sum_i \sum_j T_{ij} c_{ij} + \beta \sum_i \sum_j \ln T_{ij} \right)$$

$$\sum_j T_{ij} = Q_i; \quad \sum_i T_{ij} = D_j, \quad T_{ij} \geq 0,$$

де –  $T_{ij}$  позначена кореспонденція із зони  $i$  в зону  $j$ . Під  $\beta$  розуміється середньозважена вартість проїзду. Через  $c_{ij}$  позначена вартість проїзду одиниці потоку з сегмента  $i$  в сегмент  $j$ . Кількість поїздок з зони  $i$  будемо позначати через  $Q_i$ . Кількість поїздок в зону  $j$  через  $D_j$ .

– модель проміжних можливостей. Особливістю цієї моделі є припущення про те, що обсяг кореспонденції між двома центрами тяжіння населення визначається не тільки відстанню між ними, а кількістю аналогічних центрів тяжіння на шляху пересування. Тут також застосовується ранжування центрів тяжіння в залежності від їх віддаленості від точки відправлення користувача.

## 2. Моделі розподілу потоків:

– статична модель рівноважного розподілу передбачає, що вибір шляху учасниками руху заснований на прагненні мінімізувати індивідуальну узагальнену ціну поїздки. За результатами такого вибору виявляється значення інтенсивності потоку на кожному з елементів мережі. У свою чергу, інтенсивність впливає на узагальнену ціну поїздки і індивідуальний вибір шляху. Таким чином, під впливом цих факторів в системі встановлюється рівноважний розподіл потоків.

– модель багато користувачів рівноваги - це динамічна модель розподілу потоків, в основі якої є відмінності між класами автомобілів. Транспортні засоби різних класів надають різний вплив на загальну завантаженість шляху, тобто вантажні автомобілі сильніше впливають на ступінь завантаженості, ніж легкові. Також на дорогах існують обмеження проїзду автомобілів різних класів. З цього випливає, що представники різних класів автомобілів розподіляють за різними смугами руху, але знаходяться у взаємодії. Розрахунок матриць кореспонденції ведеться в умовних одиницях, в які необхідно перевести завантаження для кожного класу автомобілів

– модель рівноважного розподілу зі змінним попитом на потік – це друга динамічна модель розподілу потоків, яка представляє собою алгоритм отримання розподілу і кореспонденцій. Для цього обсяг кореспонденцій між парами районів задається як функція від відстані і узагальненої ціни пересування. Однак, ця модель передбачає єдиний розподіл, тоді як в дійсності розподіл змінюється з плином часу. Таким чином, для практичного застосування необхідна доробка цієї моделі. Ці дві моделі відносяться до детермінованих. У основі лежить функціональна залежність між окремими показниками, наприклад, швидкістю і дистанцією між автомобілями в потоці. Швидкість всіх транспортних одиниць в потоці однакова, транспортні засоби однотипні, тобто мають рівні динамічні габарити.

– динамічні моделі рівноважного розподілу є найбільш перспективними для розробки і вивчення. Від попередніх моделей вони відрізняються введенням додаткової зміни – часу. Це значно ускладнює завдання, так як для відстеження точного часу проїзду, потрібно застосування імітаційних моделей. Це призводить до того, що навіть при використанні простих моделей необхідний великий обчислювальний ресурс, і практичне застосування даних моделей стає можливим тільки при використанні сучасних комп'ютерів

## 3. Модель оптимальних стратегій.

Перераховані раніше моделі більшою мірою орієнтовані на особистий транспорт. Модель оптимальних стратегій дозволяє розглянути особливості завантаження мережі громадського

транспорту. Потік розглядається як імовірнісний процес. Наприклад, розподіл тимчасових інтервалів між автомобілями в потоці може прийматися не строго визначеним, а випадковим. Пасажир, може пересуватися на автобусах різних маршрутів в залежності від того, який з них прийде першим. Отже, дана модель заснована на випадковому виборі користувачів і є стохастичною (вірогідна).

П). Імітаційні моделі, або моделі динаміки транспортного потоку. Імітаційне моделювання – це універсальний метод дослідження систем, поведінка яких залежить від дії випадкових чинників [7]. При імітаційному моделюванні алгоритм, що реалізовує модель, відтворює процес функціонування системи в часі, причому імітуються елементарні явища, складові процесу, із збереженням їх логічної структури і послідовності протікання у часі. Для імітаційного моделювання практично відсутні обмеження на сферу їх застосування. Воно ефективно використовується в наступних задачах:

– де не існує закінченої постановки задачі дослідження, а йде процес пізнання об'єкту моделювання;

– де характер процесів, що протікають в системі, не дозволяє описати ці процеси в аналітичній формі;

– де необхідно спостерігати за поведінкою системи протягом певного часового періоду;

– при вивченні нових ситуацій в системі або при оцінці функціонування її у нових умовах;

– коли досліджувана система є елементом складнішої системи;

– де необхідне дослідження поведінки системи при введенні в неї нових компонентів.

Існують наступні імітаційні моделі.

1. Макроскопічні моделі – описують рух автомобілів, описують рух транспортних потоків аналогічно рухам рідин або газів:

– LWR-модель (модель Лайтхілла-Уізема-Річардсона) – передбачає, що між швидкістю потоку і його щільністю існує взаємний зв'язок і стосовно кількості автомобілів виконується закон збереження мас. При цьому середня швидкість потоку є детермінованою. У зв'язку з цим модель не буде достовірною при описі ситуацій, що виникають у виїздах на другорядні дороги, звуження доріг і ін.

– модель Уізема аналогічна попередній моделі за винятком того, що має додаткову умову – передбачається, що при зростанні щільності потоку водії знижують швидкість руху, а при зменшенні щільності рухаються з більшою швидкістю.

– модель Пейна – це своєрідний закон збереження. У заданій моделі не передбачається, що швидкість руху знаходиться у функціональній залежності від щільності потоку, і для неї записується рівняння.

Макроскопічну модель корисно використовувати у наступних випадках:

– якщо ефекти, які важко описати макроскопічно, не потрібно розглядати (наприклад, зміна смуги, кілька типів автомобілів);

– якщо хтось зацікавлений лише в макроскопічних показниках;

– якщо час розрахунку моделі є критичним, наприклад, у програмах які працюють в режимі реального часу (через збільшення обчислювальної потужності, цей аспект стає менш важливим);

– якщо доступні вхідні дані надходять з неоднорідних джерел та/або несумісні, то необхідне злиття даних.

2. Кінетичні моделі засновані на динаміці фазової щільності потоку, а саме щільності розподілу автомобілів за координатами і індивідуальною швидкістю. Знання змін фазової щільності з плином часу дозволяє розрахувати макроскопічні характеристики руху.

Дані моделі розглядають зміни швидкостей транспортних засобів за рахунок процесів взаємодії та релаксації. Взаємодія автомобілів – це ситуація на дорозі, коли швидко рухається автомобіль наздоганяє їхав попереду. При цьому водій швидшого автомобіля або знижує швидкість, або робить обгін. При цьому розглядаються тільки парні взаємодії. Кінетичні моделі також знайшли застосування при описі руху змішаного потоку і багатосмугового руху.

3. Мікроскопічні моделі призначені для моделювання руху кожного автомобіля, що дозволяє отримувати більш високу точність опису руху автомобіля:

– модель проходження за лідером спочатку передбачала, що прискорення конкретного автомобіля визначається станом сусідніх автомобілів. При цьому найбільш сильний вплив робить попередній автомобіль. Також згідно даної моделі, прискорення єдиного автомобіля на дорозі дорівнюватиме нулю. В окремих випадках це може бути вірним, проте цілком логічним буде припущення, що в такій ситуації водій по можливості збільшить або зменшить свою швидкість до бажаної;

– модель оптимальної швидкості залежить від судження про те, що для кожного автомобіля є своя безпечна швидкість, яка залежить від дистанції до автомобіля-лідера. Відмінністю від попередньої моделі є те, що автомобіль, який рухається за лідером, адаптується ні до швидкості лідера, а до оптимальної швидкості в залежності від відстані до лідера. Дана модель дуже чутлива до вибору функції залежності оптимальної швидкості від дистанції. Крім того, при великих значеннях часу відбуваються зіткнення транспортних засобів, а при малих значеннях виникають нереалістичні прискорення;

– модель Трайбера (розумний водій) – одна з найбільш реалістичних моделей. Практичне застосування моделі дозволило переконатися, що вона відтворює основні спостережувані параметри транспортного потоку з високою вірогідністю. Модель будується на припущенні про те, що прискорення автомобіля – це безперервна функція швидкості щодо лідера та дистанції до нього. У моделі використовується кілька параметрів, які можуть бути задані індивідуально для кожного автомобіля: бажана швидкість руху, безпечний часовий інтервал, показники чутливості при прискоренні і гальмуванні, довжина автомобіля.

– модель клітинних автоматів. Клітинні автомати – це ідеалізоване уявлення фізичних систем, в якому час і простір дискретні, і всі елементи мають набір можливих станів[9]. Так, швидкість автомобіля і час є дискретними змінними, а дорога розбивається на умовні «ділянки», кожна з яких може бути або зайнята одним автомобілем, або вільна. На кожному кроці стан всіх ділянок одночасно оновлюється відповідно до наступних правил:

1) Прискорення. Якщо  $V_n < V_{\max}$ , то швидкість  $n$ -го автомобіля збільшується на одиницю, якщо  $V_n = V_{\max}$ , то швидкість не змінюється. (Відображення загальної тенденції водіїв рухатися з максимально допустимою швидкістю).

2) Гальмування. Якщо дистанція до лідируючого автомобіля  $d_n < V_n$ , то швидкість  $n$ -го автомобіля зменшується до  $d_n - 1$ . (Гарантія відсутності зіткнень з попереду автомобілем, що йде).

3) Випадкові обурення. Якщо  $V_n > 0$ , то швидкість  $n$ -го автомобіля може бути зменшена на одиницю з ймовірністю  $p$ . Швидкість не змінюється, якщо  $V_n = 0$ . (Облік випадкових відмінностей в поведінці водіїв).

4) Рух. Кожен автомобіль просувається вперед на кількість ділянок, відповідне його новій швидкості після виконання перших трьох кроків.

Вищевикладена модель є «мінімальною», тобто описує тільки основні і важливі аспекти процесу руху. Для моделювання ж більш складних ситуацій на дорозі необхідно сформулювати додаткові правила. Модель КА є вельми нестійкою при високій щільності потоку, головним чином в розвитку нестійкості відіграє роль стохастичності процесу. Це факт є серйозним недоліком моделі в порівнянні з макромоделі або ж моделями типу «слідування за лідером».

Мікроскопічні моделі особливо підходять для таких випадків:

- моделювання того, як окремі транспортні засоби впливають на трафік: це стає все більш важливим, оскільки сучасні системи допомоги водіям, (такі як адаптивний круїз-контроль або інфраструктура до транспортного засобу та зв'язку між транспортними засобами), а також інші програми інтелектуальних транспортних систем (ITS) набирають широкого застосування;
- ситуації, в яких гетерогенність трафіку відіграє важливу роль, наприклад, імітуючи ефекти обмежень швидкості або заборони на проїзд для вантажних автомобілів, оскільки загальною метою всіх заходів для оптимізації трафіку є гомогенізація трафіку;
- опису поведінки людей, включаючи помилки оцінки, час реакції;
- неухважність та очікування: мікроскопічні моделі дозволяють оцінити, як різні стилі водіння впливають на пропускну спроможність та стабільність;
- візуалізація взаємодій між різними учасниками дорожнього руху (автомобілі, вантажівки, автобуси, велосипедисти, пішоходи тощо);
- генерування навколишнього трафіку для наукових водійських імітаторів, що використовуються для фізіопсихологічних досліджень водіїв або навіть для ігрових тренажерів.

4. Відносно новим видом моделей для моделювання транспортних потоків є так звані мезоскопічні моделі. Мезоскопічні моделі поєднують мікроскопічні та макроскопічні підходи до

гібридній моделі. У моделях локальної сфери параметри мікроскопічної моделі можуть залежати від макроскопічних величин, таких як щільність руху або місцева швидкість і швидкість дисперсії.

І навпаки, в так званих магістерських рівняннях динаміка макроскопічної кількості (кількість транспортних засобів у пробці) описується в термінах мікроскопічних рівнянь стохастичної швидкості для транспортних засобів. Газ-кінетичні моделі руху використовують ідеалізовані «зіткнення» для опису динаміки кількості, яка називається щільністю фазового простору  $\rho \sim (x, t, v)$ , що включає в себе трафік і місцевий ймовірнісний розподіл швидкості транспортного засобу. У класі паралельно-гібридних моделей критичні ділянки мережі трафіку (наприклад, перехрестя та світлофор) описуються мікроскопічно, а інші – макроскопічно.

**Висновок.** Таким чином, на підставі наведеної інформації можна зробити висновок про те, що створити єдину модель, яка поєднала б у собі прогнозування та імітацію транспортного потоку, вкрай складно. В першу чергу труднощі пов'язані з тим, що кожна з моделей працює з різними початковими умовами. Так, в прогнозних моделях використовуються характеристики ВДМ, її геометрія і параметри транспортного потоку. Імітаційні моделі засновані на усереднених характеристиках потоку і розглядають кожен автомобіль як окремо, так і у взаємодії з автомобілями, що рухаються поруч. Наведена класифікація дозволяє визначити, яку модель зручніше використовувати в залежності від цілей і завдань. Для дослідження параметрів руху, пропускної спроможності вулиць і доріг, затримок транспортного потоку доцільність ним буде використання імітаційних моделей

1. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков [Текст]: пер. с англ. – М.: Мир, 1966. – 288 с.
2. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими [Текст]: пер. с англ. – М.: Транспорт, 1972. – 423 с.
3. Васильева Е.В., Левит Б.Ю., Лившиц В.Н. Нелинейные транспортные задачи на сетях. – М: Финансы
4. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации дорожного движения. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
5. Брайловский Н.О. Моделирование транспортных систем [Текст] / Н.О. Брайловский, Б.И. Грановский. – М.: Транспорт, 1978. – 125 с.
6. Kerner B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory: 1st Edition., 2009, XIII, 265 p. 123 illus.
7. Пустюльга С.І., Мурований І.С. Систематизована формалізація вхідних даних роботи маршрутних автобусів для оптимізації міських пасажирських перевезень/ С.І. Пустюльга, І.С. Мурований // Науковий журнал «Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті». – Луцьк: Луцький НТУ, 2014. – Вип.1. – С.102-108
8. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование / Кельтон В., Лоу А. Классика CS. 3-е изд. – Киев: 2004. – 847 с.:
9. Гасников А.В. Введение в математическое моделирование транспортных потоков. Издание 2-е, испр. и доп. – М.: МЦНМО, 2014. – 426 с.
10. Treiber M., Hennecke A., Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations // Phys. Rev. E. 2000. V. 62. P. 1805-1824. и статистика, 1981.

## REFERENCES

1. Heit F. (1966) Matematicheskaja teorija transportnyh potokov [*Mathematical Theory of Traffic Flow*]. Moscow: Mir [in Russian]
2. Drew D. (1972) Traffic Flow theory and control [*Teoriya transportnykh potokov i upravleniye imi*]. Moscow: Transport [in Russian]
3. Silianov V.V. (1977) Theory of traffic flows in road design and traffic management [*Teoriya transportnykh potokov v proyektirovanii dorog i organizatsii dorozhnogo dvizheniya*]. Moscow: Transport [in Russian]
4. Braylovskiy N.O. & Granovskiy B.I. (1978) Modeling of transport systems [*Modelirovaniye transportnykh sistem*]. Moscow: Transport [in Russian]
5. Kerner B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory: 1st Edition., 2009, XIII, 265 p. 123 illus.
6. Pustiulha S.I. & Murovani I.S. (2014) Systematized formalization of the input data of the work of route buses for optimization of city passenger traffic [*Systematyzovana formalizatsiia vkhidnykh danykh roboty marshrutnykh avtobusiv dlia optymizatsii miskykh pasazhyrskykh perevezhen*]. Scientific journal "Modern technologies in mechanical engineering and transport". Lutsk. Vol. 1. P. 102-108 [in Ukrainian]
7. Kelton V. & Lou A. (2004). Simulation modeling [*Imitatsionnoye modelirovaniye*]. Kiev: Klassika CS [in Russian]
8. Gasnikov A.V. (2014) Introduction to mathematical modeling of transport flows [*Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye transportnykh potokov*]. Moscow: MCNMO [in Russian]
9. Vasilyeva E.V., Levit B.Yu. & Livshits V.N. (2014) Nonlinear Transport Problems on Networks [*Nelineynyye transportnyye zadachi na setyakh*]. Moscow: Finansy. [in Russian]
10. Treiber M., Hennecke A. & Helbing D. (2000) Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. Phys. Rev. E. 2000. V. 62. P. 1805-1824.

**Мурований І.С., Онищук В.П. Методи моделювання транспортних і пасажирських потоків**

Главная проблема, с которой сталкивается сегодня автомобильный транспорт в городе - это транспортные пробки, которые возникают по ряду причин. Одной из главных причин транспортных заторов является рост автомобильного транспорта, сопровождается увеличением интенсивности движения на улично-дорожной сети (ВДМ) города. Это происходит вследствие того, что инфраструктура города не успевает развиваться с такой же интенсивностью, с которой растет количество автомобилей. Для выработки решения данной проблемы применяют методы математического моделирования. Математические модели позволяют имитировать существующую дорожную ситуацию, а также прогнозировать возможные варианты ее развития в зависимости от различных факторов. С целью описания свойств математических моделей, применяемых для изучения транспортных потоков, предложена классификация моделей и их особенности.

**Ключевые слова:** транспорт, транспортная система города, моделирование, транспортные потоки, пассажирские потоки.

**I. Murovaniy, V. Onyshchuk. Methods of modeling transport and passenger flows**

The main problem-facing road Transport in the city today is traffic congestion that occurs for a number of reasons. One of the main causes of traffic congestion is the growth of road transport, accompanied by an increase in traffic on the street-road network (VDM) of the city. This is because the infrastructure of the city does not have time to develop with the same intensity with which the number of cars is growing. To develop a solution to this problem, methods of mathematical modeling are used. Mathematical models allow to simulate the existing road situation, as well as to forecast possible variants of its development depending on various factors. In order to describe the properties of mathematical models used to study transport flows, a classification of models and their features is proposed.

**Keywords:** transport, transport system of the city, modeling, traffic flows, passenger flows.

**АВТОРИ:**

**МУРОВАННИЙ** *Ігор Сергійович*, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Автомобілі і транспортні технології», Луцький НТУ, e-mail: [igor\\_lntu@ukr.net](mailto:igor_lntu@ukr.net)

**ОНИЩУК** *Василь Петрович*, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортні технології, Луцький НТУ, e-mail: [wasy\\_l\\_o@ukr.net](mailto:wasy_l_o@ukr.net);

**АВТОРЫ:**

**МУРОВАННЫЙ** *Игорь Сергеевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и транспортные технологии», Луцкий НТУ, e-mail: [igor\\_lntu@ukr.net](mailto:igor_lntu@ukr.net)

**ОНЫЩУК** *Василий Петрович*, к.т.н., доцент кафедры автомобилей и транспортных технологий, Луцкий НТУ, e-mail: [wasy\\_l\\_o@ukr.net](mailto:wasy_l_o@ukr.net);

**AUTHORS:**

Igor Murovaniy, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: [igor\\_lntu@ukr.net](mailto:igor_lntu@ukr.net)

Vasy\_l ONYSHCHUK, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: [wasy\\_l\\_o@ukr.net](mailto:wasy_l_o@ukr.net);

Стаття надійшла в редакцію 15.10.2017р