

Гук¹ В.І., Запорожцева² О.В.

¹ Харківський національний університет будівництва та архітектури

² Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ПОЧАТОК ДИНАМІЧНОЇ ТЕОРІЇ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ

Висвітлюється новий підхід до вивчення станів транспортного потоку на основі розкриття динаміки його характеристик. Зміна станів або динаміка теорії як системи транспортний потік-дорога вперше апроксимується взаємною зміною у часі швидкості та інтенсивності. Наводяться рівняння для вирішення практичних задач динаміки зміни швидкості і динаміки зміни інтенсивності.

Ключові слова: транспортний потік, інтенсивність, швидкість, кількість потоку, щільність.

Постановка проблеми. Вирішення проблем міського руху для автомобільного транспорту вимагає глибокого вивчення особливостей і закономірностей зміни станів транспортного потоку з урахуванням динаміки зміни його основних характеристик: швидкості, інтенсивності, тобто дуальності, оскільки автомобілі потоку одночасно є джерелами як швидкості, так і інтенсивності.

Так як всі міські транспортні проблеми починають різко загострюватися при виникненні безперервних насичених потоків автомобілів, об'єднаємо в поняття «транспортний потік» систему, що включає в себе автомобілі, водіїв, вулиці і навколишнє середовище. Врахуємо, що даній системі притаманний зворотний зв'язок, здійснюваний водіями та підсистемою управління дорожнім рухом. Основним принципом системи «транспортний потік» є цілісність процесу руху, тобто первинним є динамічна цілісність потоку, а вторинним – положення і швидкість автомобілів у потоці.

Уточнимо поняття одиниці системи «транспортний потік» та її розмірність. Транспортний потік складається з автомобілів, які перебувають у процесі руху на проїзній частині вулиць. Основною одиницею транспортного потоку є автомобіль. Однак при вирішенні практичних задач необхідно враховувати різні типи транспортних засобів і знати кількість автомобілів у групі, черзі, на стоянці. Тому величина названа «кількістю потоку», а його одиниця – автомобіль або група автомобілів.

Транспортний потік рухається вулицями і дорогами та за деякий час t долає в просторі шлях деякої довжини L . Вулиці і дороги також мають просторову протяжність і служать складовим елементом системи «транспортний потік». Тому в якості одиниці протяжності пересування L приймаємо «шлях», що вимірюється в метрах, кілометрах.

Транспортний час t – проміжок часу, необхідний для виконання транспортного процесу, вимірюється в секундах, хвилинах, годинах, добах і роках [2, 3].

Таким чином, маємо три фундаментальні одиниці транспортного потоку: кількість потоку (авт.), шлях (м, км) і час (с, год.). Зміни у часі фундаментальних характеристик транспортного потоку – «кількості потоку» і «шляху» будуть представляти відповідно інтенсивність $d\lambda/dt$ (авт./год.) і швидкість dL/dt (км/год.) транспортного потоку. Уточнимо, що інтенсивність $N = d\lambda/dt$ найбільш повно характеризує зміну транспортного потоку в перетині вулиці, біля місця спостереження, у часі, а швидкість – це більш об'єктивна характеристика руху транспортного потоку в просторі вулиці або дороги.

Відповідно, фундаментальні одиниці системи «транспортний потік» λ, L, t та похідні від них характеристики $N(t), V(t)$ – є базові змінні, відносини і добуток яких, у свою чергу, дозволяють визначити інші змінні та параметри транспортного потоку і встановити причинно-наслідкові зв'язки між ними.

Результати досліджень. Для розкриття динаміки зміни характеристик транспортного потоку в їх взаємному взаємозв'язку врахуємо, що фундаментальними поняттями вважаються одиниця потоку, протяжність шляху і час та похідні від них характеристики: інтенсивність, N (авт./год.), швидкість, V , (шлях/час), щільність, Q , (авт./шлях). Саме взаємозв'язки швидкості і інтенсивності, інтенсивності та щільності, швидкості і щільності присвячено багато досліджень. При цьому, для міських умов руху встановлено залежність $V(N)$, так і залежність $N(V)$ [1, 2, 3], але не розкрита динаміка зміни V при зміні N в часі, так і динаміка зміни N при зміні V , що змушує більш детально вивчити причину взаємозалежностей $V(N)$ і $N(V)$. Для цього розглянемо систему з двох

взаємно-зменшуваних характеристик потоку V і N . Бистроту зменшення у часі швидкості та інтенсивності опишемо рівняннями:

$$\frac{dN}{dt} = aN - bNV \quad (a, b > 0), \quad \frac{dV}{dt} = nV - cNV \quad (n, c > 0), \quad (1)$$

де a, b, n, c – чисельні коефіцієнти, які мають розмірність; $a-1/t, b-1/\text{км}, n-1/t, c-1/\text{авт.}$

Не беручи до уваги t , з рівнянь (1) визначимо закон зменшення відстані між автомобілями, км/авт.

$$\frac{dV}{dN} = \frac{V(n - cN)}{N(a - bV)}, \quad (2)$$

або, перетворюючи $V^a \exp(-bV) = kN^n \exp(-cN)$, де $k = \frac{V_0^a \exp(-bV_0)}{N_0^n \exp(-cN_0)}$.

Рішення рівняння (2), що описує зміну простору смуги руху, яка припадає на один автомобіль (км/авт.), неперіодичне і графічно зображено на рисунку 1. Як видно з графіка, рис. 1, швидкість транспортного потоку зменшується асимптотично, майже до нуля, при насиченому колонному русі (крива 1), а інтенсивність надходження автомобілів на міську магістраль може збільшуватися необмежено.

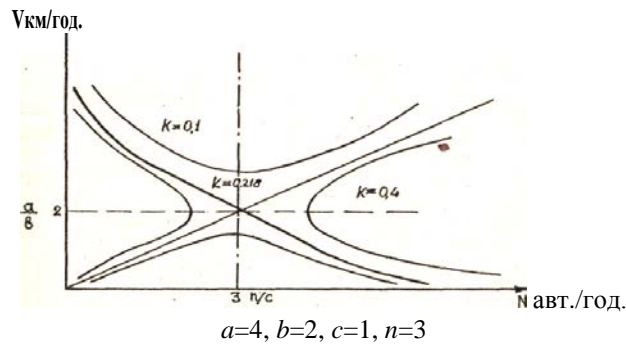


Рис.1. Узагальнений характер взаємозв'язків між швидкістю і інтенсивністю

Якщо в початковий момент часу значення швидкості і інтенсивності великі, то при насиченні транспортного потоку, швидкість та інтенсивність будуть зменшуватися до тих пір (крива 3), поки одна із змінних потоку (наприклад швидкість V) першою не досягне критичного рівня $V_{кр} = a/b$.

Далі під впливом зростання N, V потоку буде зменшуватися. Зростання V транспортного потоку і його і N при реконструктивних заходах, спрямованих на розширення існуючих вулиць, або при будівництві нових, які дублюють існуючі магістралі, вулиці в місті, описується кривою 3. Типовий характер зміни V та N руху на ділянці вулиці, коли швидкість вільного руху починає зменшуватися зі зростанням інтенсивності руху до критичного значення, після чого до затору зменшуються і швидкість, і інтенсивність, представлений кривою 4. Криві на рис.1 охоплюють всю область взаємозв'язків між швидкістю і інтенсивністю: від характеристик залежності в перетині вулиці і дороги до соціальної необхідності збільшення швидкості руху і зростання рівня автомобілізації населення. При цьому враховується, що зростання швидкісних можливостей нових транспортних засобів та свободи руху на нових міських магістралях призводять до залучення автомобілів і швидкого збільшення інтенсивності руху до рівня максимального насичення.

Розглянемо тепер відношення і добутки просторової $V(t)$ і тимчасової $N(t)$ характеристик транспортного потоку, а також швидкість їх взаємної зміни, або відношення $V(t)$ і $N(t)$ до перших похідних за часом dt .

Припустимо, що зв'язок між $V(t)$ і $N(t)$ апроксимується прямою, яка проходить через початок координат. Дане припущення справедливо для умов насиченого руху, коли разом з інтенсивністю

зменшується до нуля при заторі і швидкість ($N=0; V=0$). Рівняння, що характеризує відношення $N(t)$ до $V(t)$ [1, 2] наступне:

$$N(t) = QV(t), \quad (3)$$

де Q – узагальнена змінна потоку «щільність», що визначається як бистрота зміни швидкості транспортного потоку при зміні його інтенсивності, авт./км.

У той же час рівняння, що характеризує зворотне відношення $V(t)$ к $N(t)$ має вигляд:

$$V(t) = \frac{1}{Q}N(t) = S \cdot N(t), \quad (4)$$

де S – відома узагальнена змінна насиченого потоку – динамічний габарит (інверсійна щільність), км/авт.

Великий практичний інтерес викликає нова змінна транспортного потоку, яка визначається добутком $N(t)$ і $V(t)$ та названа динамічною потужністю системи «транспортний потік-дорога»:

$$M(t) = N(t) \cdot V(t). \quad (5)$$

З урахуванням (3) та (4) отримаємо наступні формули для потужності $M(t) = Q \cdot V^2(t) = \frac{N^2(t)}{Q} = SN^2(t)$, які вказують, що потужність в кінці перегону вулиці чи дороги (виходу) буде зменшуватися порівняно з початком перегону (входом). Отже, пропускна спроможність перетину вулиці і перегону по суті різні речі.

Розглянемо характеристики, які залежать від бистроти зменшення V та N в часі.

Рівняння, що описує зміну V автомобілів в залежності від динаміки зміни N на ділянці вулиці чи дороги, де на місці стиснення потоку (виникають черги) і зростає напруженість руху

$$V(t) = C \frac{d}{dt} N(t). \quad (6)$$

Рівняння (6) дозволяє отримати залежність $N(t)$ від $V(t)$ в явному вигляді для випадку, коли має місце динаміка збільшення (зменшення) інтенсивності $dN(t)/dt$. Проінтегрував (1.6):

$$N(t) = \frac{1}{C} \int_0^t V(t) dt + N(0) \quad \text{або} \quad N(t) - N(0) = \frac{1}{C} \int_0^t V(t) dt, \quad (7)$$

де $N(0)$ – значення N в початковий момент часу, $t=0$.

Якщо $N(t)$ – розривна (ступінчаста) функція (такий рух часто спостерігається на магістралях з регульованим режимом руху), то $dN(t)/dt$ не існує і рівняння (6) не має рішення. Тому зробимо заміну змінних, вводячи одиничну характеристику зміщення (шлях) $L(t)$, де, як відомо, $L(t) = \int V(t) dt$, і, отже, $V(t) = \frac{d}{dt} L(t)$. Швидкість $V(t)$ завжди є безперервна функція часу, тому, враховуючи (6) і те, що пряма, яка апроксимує, проходить через початок координат, одержуємо рівняння для варіації відносно точки $N(t)=0$, $L(t) = CN(t)$ або $dL(t) = CdN(t)$.

Таким чином, закон збільшення напруженості в транспортному потоці при його стисканні буде виражатися однією з наступних формул (динаміка стиснення):

$$N = \frac{L}{C}, \quad N = \frac{1}{C} \int V(t) dt, \quad L = C \cdot N, \quad V = C \frac{dN}{dt}. \quad (8)$$

Отримаємо взаємозв'язок між $N(t)$ и $dV(t)/dt$:

$$N(t) = J \frac{d}{dt} V(t). \quad (9)$$

В рівнянні (9) інтенсивність $N(t)$ є функція від прискорення $dV(t)/dt$, яке часто має місце в транспортному потоці, і в інтервалі часу $0 \leq T \leq t$ рішення рівняння має вигляд:

$$V(t) = \frac{1}{J} \int_0^t N(t) dt + V(0) \text{ або } V(t) - V(0) = \frac{1}{J} \int_0^t N(t) dt. \quad (10)$$

Коли функція $V(t)$ розривна, що відповідає руху транспортного потоку по магістралям з жорстким некоординованим перемиканням сигналів світлофора, то рівняння (9) не має рішення. Використаємо змінну «кількість потоку» $\lambda(t)$, яка дорівнює $\lambda(t) = JV(t)$, де $\lambda(t) = \begin{cases} J[V(t) - V(0)] & \text{при } t \geq 0, \\ 0 & \text{при } t \leq 0. \end{cases}$ Тоді $N(t) = d\lambda(t)/dt$. У випадку, коли N є безперервною функцією часу, кількість потоку $\lambda(t)$ пов'язана з інтенсивністю $N(t)$ співвідношенням:

$$\lambda(t) = \int_0^t N(t) dt. \quad (11)$$

Фактична величина N за час dt дорівнює зміні кількості потоку за той же час dt , тобто $N = d(\lambda)$, що вказує на закон зміни кількості транспортного потоку λ . Цей закон дозволяє по початковій швидкості автомобілів V_0 і відомій кількості потоку λ (величина, на яку змінилася інтенсивність) знаходити кінцеву швидкість автомобілів в потоці, минаючи всі проміжні обчислення V_i .

Висновки. Рівняння (1.11) показує, що змінна «кількість потоку» має важливу властивість – адитивність, і тому в якості кількості потоку можна розглядати як один автомобіль, так і групу автомобілів. Це рівняння дозволяє вирішувати дві типові задачі: за відомою величиною інтенсивності знаходити закон зміни кількості автомобілів в потоці або за відомим законом зміни кількості автомобілів - інтенсивність потоку.

Наявність в рівняннях (8) і (9) параметра інерційності, який характеризує акумуляцію швидкісних якостей автомобілів, дозволяє описати цей процес наступними формулами:

$$\lambda = JV, \quad N = J \frac{dV}{dt}, \quad V = \frac{\lambda}{J}, \quad V = \frac{1}{J} \int N dt. \text{ Таким чином, залежність між основними похідними}$$

характеристиками транспортного потоку описується наступними рівняннями:

1. Залежність швидкості $V(t)$ від інтенсивності $N(t)$:

$$V(t) = \frac{1}{Q} N(t), \quad V(t) = C \frac{d}{dt} N(t), \quad V(t) = \frac{1}{J} \int N(t) dt.$$

2. Залежність інтенсивності $N(t)$ від швидкості $V(t)$:

$$N(t) = QV(t), \quad N = J \frac{d}{dt} V(t), \quad N(t) = \frac{1}{C} \int V(t) dt,$$

Що аналогічно загальним законам моделювання систем [1, 2, 4], і тому дозволяє складати рівнянь динаміки транспортного потоку в часі і просторі.

2. Гук В.І. Транспортні потоки : теорія та їх застосування в урбаністиці: монографія / В.І. Гук, Ю.М. Шкодовський. – Х.: Золоті сторінки, 2009. – 232 с.
3. Гук В. Теория измерителей транспортных потоков. Параметры трафика /В.И.Гук //Palmarium Academic Publishing 2017. - 162 с.
4. Запорожцева Е.В. Пропускная способность автомагистралей в транспортных коридорах / Е.В. Запорожцева // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов: материалы ежегодной междунар. науч.-практ. конф.: сб. науч. трудов. – Минск, 2014. – С. 11–15.

REFERENCES

1. Guk, V.I. (1991). Elementy teorii transportnykh potokov i proektirovanie ulits i dorog [Elements of the theory of transport flows and the design of streets and roads]. Kyiv: UMK VO. 254 p.
2. Guk, V.I., Shkodovskiy, Yu.M. (2009). *Transportnye potoki: teoriya ta yikh zastosovannya v urbanistytsi*. [Traffic flow: the theory of the past of urbanistic]. Kharkov: Zoloti storinky. 232 p.
3. Guk, V. (2017). *Teoriya izmeriteley transportnykh potokov*. Parametryi traffika [Theory of traffic flow meters. Traffic Settings]. Palmarium Academic Publishing. 162 p.
4. Zaporozhtseva, E.V. (2014). Propusknaya sposobnost avtomagistralei v transportnykh koridorakh. [Highway capacity of motorways in transport corridors]. Sovershenstvovanie organizatsii dorozhnogo dvizheniya i perevozok passazhirov i gruzov – Improving the organization of road traffic and passenger and cargo transportation: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (pp. 11-15). Minsk.

Гук В.І., Запорожцева Е.В. Начало динамической теории транспортного потока.

Освещается новый подход к изучению состояний транспортного потока на основе раскрытия динамики его характеристик. Изменение состояний или динамика теории как системы «транспортный поток-дорога» впервые аппроксимируется взаимным изменением во времени скорости и интенсивности. Приводятся уравнения для решения практических задач динамики изменения скорости и динамики изменения интенсивности.

Ключевые слова: транспортный поток, интенсивность, скорость, количество потока, плотность.

V. Guk, H. Zaporozhtseva The beginning of the dynamic theory of traffic flow.

The article offers a new approach to the study of traffic stream conditions based on the analysis of traffic flow characteristics. The change in state or theory dynamics within the context of quot; traffic flow-road quot; system is for the first time correlated with the change in speed and density over time. Equations are given for solving practical problems of the dynamics of the change in speed and the dynamics of the change in density.

Keywords: traffic flow, intensity, speed, flow rate, density.

АВТОРИ:

ГУК Валерій Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри містобудування та урбаністики, Харківський національний університет будівництва та архітектури, e-mail: vguk@ukr.net

ЗАПОРОЖЦЕВА Олена Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Організація і безпека дорожнього руху», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: zhelen77@ukr.net

АВТОРЫ:

ГУК Валерий Иванович, д.т.н., профессор кафедры градостроительства и урбанистики, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, e-mail: vguk@ukr.net

ЗАПОРОЖЦЕВА Елена Владимировна, к.т.н., доцент кафедры организации и безопасности дорожного движения, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, e-mail: zhelen77@ukr.net

AUTHORS:

Valery HUK, Doctor of Science in Engineering, Professor of Town Planning and Urban Planning Department, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, e-mail: vguk@ukr.net

Helen ZAPOROZHHTSEVA, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of organization and road safety, Kharkov National Automobile and Highway University e-mail: zhelen77@ukr.net

Стаття надійшла в редакцію 30.04.2018 р.