УДК 656.13

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПАСАЖИРОПОТОКІВ У МІСТАХ

Понкратов Д.П.

PASSENGER FLOWS MODELING FEATURES IN CITIES

Ponkratov D.

У статті розглянуто особливості моделювання пасажиропотоків у маршрутній системі міського пасажирського транспорту. Увагу зосереджено на формалізації взаємозв'язку між характеристиками альтернативних шляхів пересування та величиною кореспонденції, що за ними буде реалізовано. В якості змінних величин, що залежать від величини пасажиропотоку виділено імовірність відмови пасажиру в посадці та коефіцієнт використання пасажиромісткості транспортного засобу. Запропонований підхід може бути використано для моделювання пасажиропотоків у маршрутних системах значних та найзначніших міст.

Ключевые слова: *пасажиропотік, узагальнена вартість пересування, імовірність відмови пасажиру в посадці, коефіцієнт використання пасажиромісткості.*

Вступ. Формування керуючих впливів щодо удосконалення організації пасажирських перевезень у містах передбачає використання в якості вихідних даних відомості про пасажиропотоки, що є характеристикою попиту мешканців міста на пересування. Визначення характеристик пасажиропотоку натурними методами пов'язано із деякими труднощами, основними з яких є неможливість розглянути його перерозподіл у зв'язку із зміною параметрів пересування пасажирів у маршрутному транспорті. Внаслідок цього обґрунтування проектних рішень з удосконалення перевізного процесу виконують з використанням моделювання процесу формування пасажиропотоків на маршрутній мережі міського пасажирського транспорту. Використання цього методу дає змогу розглянути наслідки різних рішень з удосконалення перевізного процесу та на підставі їх співставлення обирати той, що при найменших витратах дозволить досягти вагомого ефекту.

Постановка проблеми. Обґрунтованість рішень з удосконалення перевізного процесу буде спостерігатись у тому випадку коли модель буде як найбільше відповідати реальному процесу формування пасажиропотоків, тобто буде враховувати особливості цього процесу. Однією з них є погіршення характеристик пересування пасажирів при збільшення попиту на користування цією альтернативою (маршрутом міського пасажирського транспорту або групою маршрутів). Отже підвищення адекватності моделей формування пасажиропотоків у містах шляхом врахування вагомих факторів та взаємозв'язків між ними є актуальним завданням, як з практичної, так й теоретичної точок зору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При моделюванні пасажиропотоків слід враховувати взаємний зв'язок між характеристиками пересування пасажиропотоків та умовами пересування пасажирів. Ігнорування цих особливостей не призводить до значних похибок при недостатньо великому завантаженні маршрутної мережі. У разі перевищення транспортної пропозиції над транспортним попитом факт погіршення характеристик шляху пересування є вагомим та нехтування їм значно відображається на адекватності розрахунків [1].

Методом, що враховує зазначені обставини є рівноважний розподіл (equilibrium assignment). В його основу покладено принципи, сформульовані Уолдропом, щодо користувальницької та системної рівноваги у транспортній мережі [2]. Спочатку цей метод використовували для моделювання транспортних потоків, а потім його було адаптовано й для розрахунку пасажирських потоків [1, 3, 4].

Із метою врахування взаємозв'язку між величиною попиту на використання альтернативи та характеристиками пересування в мережі для знаходження рівноважного розподілу використовують метод «обмеження за пропускною (провізною) здатністю» (capacity restraint) [5]. В його основу покладено той факт, що зі зростанням попиту на використання альтернативи погіршуються її характеристики. Це призводить до перерозподілу потоків в мережі та має бути враховано шляхом зміни умов сполучення на тому чи іншому елементі мережі. При чому погіршення умов користування альтернативою стає помітним вже при навантаженнях, значно менших за максимально можливі [6].

Для моделювання взаємозв'язку між ступенем завантаженості автомобільної дороги і швидкістю (часом) руху транспортних засобів використовуються різні функції, найбільш відомою з яких є BPR–функція [7]. Функції, що використовуються для опису погіршення характеристик шляху пересування при зростанні величини пасажиропотоку, як правило, отримують за результатами натурних спостережень [1, 4, 8].

Наприклад, у праці [8] при вирішенні завдання розподілу пасажиропотоків на сумісній ділянці маршрутної мережі користуються залежністю:

$$c_s^m = tv^s + p_{wait}\left[\frac{\alpha^m}{d_s} + \beta^m\left(\frac{V_s + \bar{V}_s}{K_s}\right)^{n^m}\right] + p_{walk}tc^s + \frac{1}{v_{time}^m} fare^s,$$

де c_s^m – узагальнена вартість шляху в часовому вираженні; m – вид транспорту (метро, автобус); tv^s, tc^s – відповідно час поїздки й пішохідного підходу; p_{wait}, p_{walk} – відносні вагові коефіцієнти часу очікування та пішохідного підходу; v_{time}^m – вартість часу, що залежить від виду транспорту, що використовується; d_s – загальна інтенсивність руху транспортних засобів на маршрутах, що проходять на ділянці s; α^m – параметр, що залежіть від процесу прибуття пасажирів і транспортних засобів до зупинного пункту; V_s – кількість пасажирів, що підійшли до зупинного пункту; $\bar{V}_s$ – кількість пасажирів у салоні транспортного засобу; β^m; n^m – параметри функції; K_s – загальна кількість пасажиро-місць, надана всіма маршрутами, що проходять на ділянці s; $fare^s$ – плата за проїзд.

За такого підходу зростання пасажиропотоку позначається на збільшенні витрат часу пасажирів на очікування транспортного засобу та поїздки у ньому. У той же час недостатньо враховано вплив дискомфорту через переповнення транспортного засобу на рішення, що приймають пасажири щодо вибору шляху пересування.

Такий підхід, однак, є спрощеним і не повною мірою відповідає фізичній сутності процесу, що розглядається. У першому випадку припущення про зростання часу очікування зі збільшенням кількості пасажирів, які бажають здійснити поїздку у транспортному засобі, є цілком виправданим. Попри це, намагання оцінити ступінь дискомфорту пасажирів, викликаного переповненням транспортних засобів додатковими хвилинами, є, більшою мірою, штучним прийомом.

Цибулка Я. вказує, що дискомфорт у системі міського громадського транспорту можна вимірювати ступенем психологічної та фізичної втоми [9].

Мета статті. У праці запропоновано підхід щодо оцінки альтернативних варіантів шляху пересування пасажирів, що враховує взаємозв’язок між характеристиками привабливості цих шляхів та величиною пасажиропотоку, що за ними реалізується.

Результати досліджень. Оцінку альтернативних варіантів шляху пересування можна проводити за узагальненою вартістю пересування:

$$C_{перij}^k = \left(\sum_{i,j}\frac{l_{пеш\ i(j)}^k}{V_{пеш}} + \sum_{z=1}^{n}\left(\frac{l_{мп}^z}{V_c^z} + \left(\frac{I_{пл}^z}{2} + \frac{\sigma_z^2}{2I_{пл}^z} + \frac{P_{отк}^z}{1-P_{отк}^z}I_{пл}^z\right)\frac{1}{60}\right) + \sum_{z=1}^{n-1} t_n^z\right)C_{час} + \frac{Д_м(-0{,}0709 + 0{,}545(П^k - 3)^2)}{Д_{рм}100} + \sum_{z=1}^{n} T^z,$$

де $l_{пеш\ i(j)}^k$ - відстань пішого руху відповідно в транспортному районі i відправлення та j прибуття при здійсненні пересування по шляху k, км; $V_{пеш}$ - середня швидкість пішохода, км/год; $l_{мп}^z$ - відстань маршрутної поїздки на z-му маршруті, км; V_c^z - швидкість сполучення на z-му маршруті, км/год; $I_{пл}^z$ - плановий інтервал руху на маршруті z, хв.; σ_z - середнє квадратичне відхилення від планового інтервалу руху, хв.; $P_{отк}^z$ - імовірність відмови пасажиру в посадці на зупиночному пункті маршруту m; $Д_м$ - доход середньостатистичного пасажира за місяць, грн.; $Д_{рм}$ - середня кількість робочих днів у місяці, дн.; $П^k$ - показник, що характеризує функціональний стан організму пасажира наприкінці здійснення пересування шляхом k, бали; $C_{час}$ - вартісна оцінка витрат часу на пересування, грн./год; T^z - величина тарифу на маршруті z, грн.; n – кількість маршрутних поїздок у мережній, од.; t_n^z – час на пішохідний рух між зупинними пунктами при здійсненні пересадки, год.

Складовими, що залежать від величини пасажиропотоку у цьому виразі є імовірність відмови пасажиру в посадці та показник функціонального стану пасажира наприкінці здійснення пересування.

Відмови пасажиру в посадці виникають при перевищенні попиту користування маршрутом над велечиною транспортної пропозиції. Її обсяг може бути охарактеризований кількістю пасажиро-місць, що надані пасажирам для здійснення поїздки та залежить від кількості та місткості транспортних засобів та експлуатаційної швидкості руху. Через виникнення відмов у посадці певна частка пасажирів не має можливості здійснити посадку у транспортний засіб через його переповнення.

Імовірність відмови пасажиру в посадці може бути визначена за формулою [10]:

$$P_{\text{від}_i} = \sum_{\Delta I_Z=-I_{\text{ср}}}^{I_{\text{ср}}} \left[\left(\sum_{K=\omega_i+1}^{M} \frac{\left(\lambda_i\left(I_{\text{ср}}+\Delta I_Z\right)\right)^K}{K!} e^{-\left(\lambda_i\left(I_{\text{ср}}+\Delta I_Z\right)\right)} \frac{K-\omega_i}{K} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\Delta I_Z^2}{2\sigma^2}} T \right],$$

де λ_i – інтенсивність прибуття пасажирів на i -й зупинний пункт, пас./хв.; K – кількість пасажирів, які прибувають на зупинний пункт, пас.; ω_i – кількість вільних місць в салоні транспортного засобу, пас. $I_{\text{ср}}$ – математичне очікування інтервалу руху, хв.; M – максимально можлива кількість пасажирів, які підійшли до зупинного пункту, пас.; σ – середнє квадратичне відхилення інтервалу руху, $0 \le I \le 2\,I_{\text{ср}}$, хв.; T – крок зміни інтервалу, $T = 2I_{\text{ср}}/n$, хв.

Згідно до вказаної залежності розподіл прибуття транспортних засобів на зупинний пункт описується нормальним законом розподілу, а підхід пасажирів – законом розподілу Пуассона.

Імовірність відмови пасажиру в посадці значною мірою зумовлена інтенсивністю їх підходу до зупинного пункту та наявністю вільних місць у салоні транспортного засобу. Ці параметри є змінними та залежать від величини кореспонденції, що реалізується за альтернативними шляхами пересування мережею.

Інтенсивність підходу пасажирів до зупинного пункту p маршруту m можна визначити за формулою:

$$\lambda_{зп\ p}^{z} = \frac{\sum_{q=p+1}^{n_{зп}^{z}} h_{pq}^{z}}{\tau}, \quad p = \overline{1, n_{зп}^{z}},$$

де h_{pq}^{z} – величина кореспонденції між зупинними пунктами p та q маршруту z, пас.; $n_{зп}^{z}$ – кількість зупинних пунктів на маршруті z, од.; τ – розрахунковий період, хв.

Величину маршрутної кореспонденції визначаємо за таким виразом:

$$h_{pq}^{z} = \sum_{i=1}^{n_м} \sum_{j=1}^{n_м} \sum_{k=1}^{n_n} h_{ij}^{k}, \quad z \in k, \quad pq \in z,$$

де h_{ij}^{k} – величина кореспонденції, що реалізується за шляхом пересування k між транспортними районами i відправлення та j призначення, пас.; n_n – кількість варіантів шляху пересування між транспортними районами i відправлення та j призначення, для яких виконується умова $\Delta C_{nepij}^{k} \le \Delta$, од.; ΔC_{nepij}^{k} - відхилення величини узагальнених витрат на пересування для k-го шляху від критичного, %; Δ – константа, що визначає область згладжування, %; $n_м$ – кількість транспортних районів у мережі, од.

Величина кореспонденції, що реалізується за шляхом пересування k між транспортними районами i відправлення та j призначення, визначається таким чином:

$$h_{ij}^{k} = H_{ij} P_{ij}^{k},$$

де H_{ij} – величина кореспонденції між транспортними районами відправлення i та призначення j, пас. P_{ij}^{k} – частка кореспонденції, що реалізується k -им шляхом пересування між транспортними районами відправлення i та призначення j.

$$P_{ij}^{k} = \frac{\exp(\beta \Delta C_{nepij}^{k})}{\sum_{k=1}^{m} \exp(\beta \Delta C_{nepij}^{k})},$$

де β - коефіцієнт моделі (β=-0,0683); m - кількість шляхів пересування, що входять до множини альтернативних, од.

Зміна показника функціонального стану пасажирів при здійсненні пересування можна визначити використовуючи методику [10]. Відповідно до неї визначення показника функціонального стану пасажира після здійснення маршрутної поїздки проводиться із залученням такої залежності:

$$П = -0{,}21 + 1{,}045(П_1\left(1 - 0{,}14\left(\kappa\gamma_{мп} + 0{,}6\right)\ln t_{мп}\right) + \\ + \kappa\gamma_{мп}\left(\kappa\gamma_{мп} + 0{,}6\right)\ln t_{мп}),$$

де $\kappa\gamma_{мп}$ – значення коефіцієнта заповнення салону під час маршрутної поїздки з урахуванням коефіцієнта пропорційності; $t_{мп}$ – час маршрутної поїздки, хв.; $П_1$ – багаточлен, який описує транспортними параметрами функціональний стан організму пасажира перед маршрутною поїздкою, тобто наприкінці її очікування. Його величина визначається таким чином :

$$П_1 = 0{,}33 + 0{,}915(П_н\left(1 - 0{,}28\ln\left(t_{оч} + 1\right)\right) + \\ + 1{,}12\ln\left(t_{оч} + 1\right)) + 0{,}00107 t_{оч},$$

де $П_н$ – початковий функціональний стан пасажира, бали.

Значення коефіцієнта пропорційності визначаємо виходячи із залежності [10]:

$$k = 1 + \left(\frac{\gamma'_{мп}}{\gamma_{мп}}\right)^2 - \frac{\gamma'_{мп}}{\gamma_{мп}},$$

де $\gamma^{/}_{мп}$ – коефіцієнт заповнення салону транспортного засобу під час маршрутної поїздки, величина якого зумовлена зайнятістю місць для сидіння пасажирів; $\gamma_{мп}$ – коефіцієнт заповнення салону транспортного засобу при здійсненні маршрутної поїздки.

Величину динамічного коефіцієнта використання пасажиромісткості транспортних засобів визначали за формулою:

$$\gamma^{z}_{(мп)ij} = \frac{\sum_{pq} l^{z}_{pq} \; F^{z}_{pq}}{q^{z}_{н} \; l^{z}_{ij} \; N^{z}_{тз}}, \quad i = p \, , \; j = q \, ,$$

де l^{z}_{pq} – довжина перегону pq маршруту z між пунктами i початку та j закінчення маршрутної поїздки, км; F^{z}_{pq} – величина пасажиропотоку на перегоні pq маршруту z, пас./год; $q^{z}_{н}$ – пасажиромісткість транспортних засобів на маршруті z, пас.; l^{z}_{ij} – відстань маршрутної поїздки пасажирів між пунктами i та j на маршруті z, км; $N^{z}_{тз}$ – інтенсивність руху транспортних засобів на маршруті z, од./год.

Запропонований підхід дає змогу врахувати взаємозв'язок між характеристиками альтернативних варіантів і величиною попиту на їх використання, як функцію від імовірності відмови пасажиру в посадці та рівня заповнення салону транспортного засобу. У якості показників, що залежать від величини попиту на користування шляхом пересування, застосовували інтенсивність підходу пасажирів до зупинного пункту, кількість вільних місць у салоні транспортного засобу та динамічний коефіцієнт використання пасажиромісткості під час здійснення маршрутної поїздки. Запропонований підхід дає змогу врахувати особливості формування пасажиропотоків у значниз і найзначніших містах, що характеризуються високим попитом мешканців на послуги маршрутного пасажирського транспорту й обмеженим рівнем транспортної пропозиції.

Висновки. Формалізовано взаємозв'язок між характеристиками альтернативних шляхів пересування та величиною кореспонденції, що за ними буде реалізовано. В якості змінних величин, що залежать від величини пасажиропотоку виділено імовірність відмови пасажиру в посадці та коефіцієнт використання пасажиромісткості транспортного засобу. Запропонований підхід може бути використано для моделювання пасажиропотоків у маршрутних системах значних та найзначніших міст.

.

Л і т е р а т у р а

1. Wu J. H., Florian M., Marcotte P. (1994) Transit equilibrium assignment: a model and solution algorithms. Transportation Science, 28(3), p. 193 – 203.
2. Wardrop J. G. (1952) Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers I I, 1, p. 325 – 378.
3. Lam W. H. K., Gao Z. Y., Chan K. S., Yang H. (1999). A stochastic user equilibrium model for congested transit networks. Transportation Research, 33B, p. 351–368.
4. De Cea J., Fernandez E. (1993). Transit assignment for congested public transport system: An equilibrium model. Transportation Science, 27(2), p. 133–147.
5. Sheffi Y. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods. – 1985. – 399 p.
6. Мягков В. Н. Математическое обеспечение градостроительного проектирования / В. Н. Мягков, Н. С. Пальчиков, В. П. Федоров. – Л.: Наука, 1989. – 144 с.
7. Ortuzar J.D. Modelling Transport. / J.D. Ortuzar, L.G. Willumsen. Third Edition. John Wiley & Sons Ltd, 2006. – 499 p.
8. Fernández J. E., De Cea J., Malbrán H. (2008) Demand responsive urban public transport system design: Methodology and application. Transportation Research Part A, 42, p. 951–972.
9. Цибулка Я. Качество пассажирских перевозок в городах / Я. Цибулка; пер. с чешск. И. В. Шварца. – М.: Транспорт, 1987. – 239 с.
10. Доля В. К. Пасажирські перевезення: підручник / В. К. Доля. – Х.: Форт, 2010. – 504 с.

R e f e r e n c e s

1. Wu J. H., Florian M., Marcotte P. (1994) Transit equilibrium assignment: a model and solution algorithms. Transportation Science, 28(3), p. 193 – 203.
2. Wardrop J. G. (1952) Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers I I, 1, p. 325 – 378.
3. Lam W. H. K., Gao Z. Y., Chan K. S., Yang H. (1999). A stochastic user equilibrium model for congested transit networks. Transportation Research, 33B, p. 351–368.
4. De Cea J., Fernandez E. (1993). Transit assignment for congested public transport system: An equilibrium model. Transportation Science, 27(2), p. 133–147.
5. Sheffi Y. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods. – 1985. – 399 p.
6. Myagkov V. N. Matematicheskoye obespecheniye gradostroitel'nogo proyektirovaniya / V. N. Myagkov, N. S. Pal'chikov, V. P. Fedorov. – L.: Nauka, 1989. – 144 s.
7. Ortuzar J.D. Modelling Transport. / J.D. Ortuzar, L.G. Willumsen. Third Edition. John Wiley & Sons Ltd, 2006. – 499 p.
8. Fernández J. E., De Cea J., Malbrán H. (2008) Demand responsive urban public transport system design: Methodology and application. Transportation Research Part A, 42, p. 951–972.
9. Tsibulka YA. Kachestvo passazhirskikh perevozok v gorodakh / YA. Tsibulka; per. s cheshsk. I. V. Shvar-tsa. – M.: Transport, 1987. – 239 s.
10. Dolya V. K. Pasazhirs'kí perevezennya: pídruchnik / V. K. Dolya. – KH.: Fort, 2010. – 504 s.

Понкратов Д.П. Особливості моделювання пасажиропотоків у містах

У статті розглянуто особливості моделювання пасажиропотоків у маршрутній системі міського пасажирського транспорту. Увагу зосереджено на формалі-

зації взаємозв'язку між характеристиками альтернативних шляхів пересування та величиною кореспонденції, що за ними буде реалізовано. В якості змінних величин, що залежать від величини пасажиропотоку виділено імовірність відмови пасажиру в посадці та коефіцієнт використання пасажиромісткості транспортного засобу. Запропонований підхід може бути використано для моделювання пасажиропотоків у маршрутних системах значних та найзначніших міст.

Ключові слова: *пасажиропотік, узагальнена вартість пересування, імовірність відмови пасажиру в посадці, коефіцієнт використання пасажиромісткості.*

Ponkratov D. Passenger flows modeling features in cities.

Paper obtained the features of passenger traffic route simulation system of urban passenger transport. Proposed approach allows considered the relationship between the characteristics of alternatives variants and demand's value for its use as a function of the failure-to-board probability and level of vehicle's salon utilization. As indicators that depend on path choice demand, have been chosen the intensity of passenger's nigh to stopping point, the number of empty seats in the salon of the vehicle and dynamic utilization passenger coefficient at the route travel time. The approach allows considering peculiarities of passenger's traffic forming in the most important cities that have a high demand of residents service's for shuttle transportation and a limited level of transport offers.

Keywords: *passenger flows, generalized cost of travel, failure-to-board probability, capacity load factor.*

Понкратов Д.П. – к.т.н., доцент, докторант кафедри «Транспортні системи і логістика» ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, e-mail: dponkratov@mail.ua.

Рецензент: д.т.н., проф. ***Соколов В.І.***

Стаття подана 12.03.2016