

*У статті розглянуто методи формування матриць кореспонденцій пасажирських переміщень, визначено їх переваги та недоліки. Встановлено також основні вимоги до моделей розрахунку обсягу кореспонденцій переміщень мешканців міських територій та виділено моделі із застосуванням нечіткої логіки. Моделі визначення обсягів кореспонденцій переміщень на основі нечіткої логіки оцінено як такі, що дозволяють отримувати надійні результати з мінімальними вхідними даними*

*Ключові слова: матриця кореспонденцій, попит населення на переміщення, моделі із застосуванням нечіткої логіки*

*В статье рассмотрены методы формирования матриц корреспонденций пассажирских перемещений, определены их преимущества и недостатки. Установлено также основные требования к моделям расчета объема корреспонденций перемещений жителей городских территорий и выделены модели с применением нечеткой логики. Модели определения объемов корреспонденции перемещений на основе нечеткой логики оценены как такие, что позволяют получать надежные результаты с минимальными входными данными*

*Ключевые слова: матрица корреспонденций, спрос населения на перемещение, модели с применением нечеткой логики*

# АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ РОЗРАХУНКУ ОБСЯГУ ПАСАЖИРСЬКИХ КОРЕСПОНДЕНЦІЙ

**А. Б. Білоус**

Кандидат технічних наук, доцент\*  
E-mail: andrij.bilous@gmail.com

**І. А. Демчук**

Аспірант\*

E-mail: demchuk\_inna@ukr.net

\*Кафедра транспортних технологій  
Національний університет  
«Львівська політехніка»  
вул. Степана Бандери, 12, м. Львів,  
Україна, 79013

## 1. Вступ

Визначення рухомості населення, транспорту й закономірностей розселення щодо об'єктів тяжіння, є предметом багатьох досліджень, що проводилися у вітчизняній і закордонній містобудівній практиці та практиці транспортного планування. У більшості випадків попит населення на переміщення в різних цілях формується у вигляді матриць кореспонденцій (МК) – кількісної характеристики переміщень у межах мережі.

Процес отримання МК ускладнюється рядом чинників, серед яких:

- стохастичність процесів формування потоків;
- відсутність математичного опису визначення основних причинно-наслідкових зв'язків процесу вибору суб'єктом пари «житло-робота»;
- нестаціонарність об'єкту в часі (зміни в планувальній структурі міста, міграції населення);
- складність збору вихідної інформації про наміри суб'єктів, активність суб'єкту з його мотивами поведінки та цілями, невідтворюваність експериментів.

Найбільшою проблемою існуючих моделей визначення МК є масштабність ресурсів та обсягу трудових витрат. В зв'язку з цим велика частина місцевих органів влади у сфері транспорту не проводять збір інформації та, як наслідок, не займаються побудовою транспортних моделей, які дозволяють адекватно до запитів населення будувати транспортну мережу. Існує практична необхідність створення простої в

обслуговуванні та відносно не ресурсовитратної методики, яка дозволяла б в короткі терміни побудувати МК та постійно її оновлювати.

## 2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Сучасні теоретичні роботи з вивчення закономірностей пересування населення базуються в основному на статистичних матеріалах, одержаних у результаті вибірових комплексних транспортних обстежень міста [1, 2]. Існують прямі методи отримання матриці через анкетні опитування мешканців міста (потребують багато часу, коштів та бажання людей брати участь в опитуванні) [3–5] та непрямі, що передбачають розрахунок МК через обсяги відправлення і прибуття автомобілів із використанням моделей розподілу поїздок між парами транспортних районів [6, 7].

Розрахунок транспортних кореспонденцій між районами міста повинен базуватися на певних моделях розселення, що мають бути засновані на емпіричних даних щодо масового обстеження кожного міста [8].

Аналіз розрахункових методів моделювання МПК свідчить про те, що вони переважно розроблені для великих міст [9, 10]. При всьому різноманітті підходів до формування матриць досить чітко простежується поділ їх на три великих умовних класи: моделі коефіцієнтів росту, теоретичні та технологічні моделі [1, 11, 12] (рис. 1).

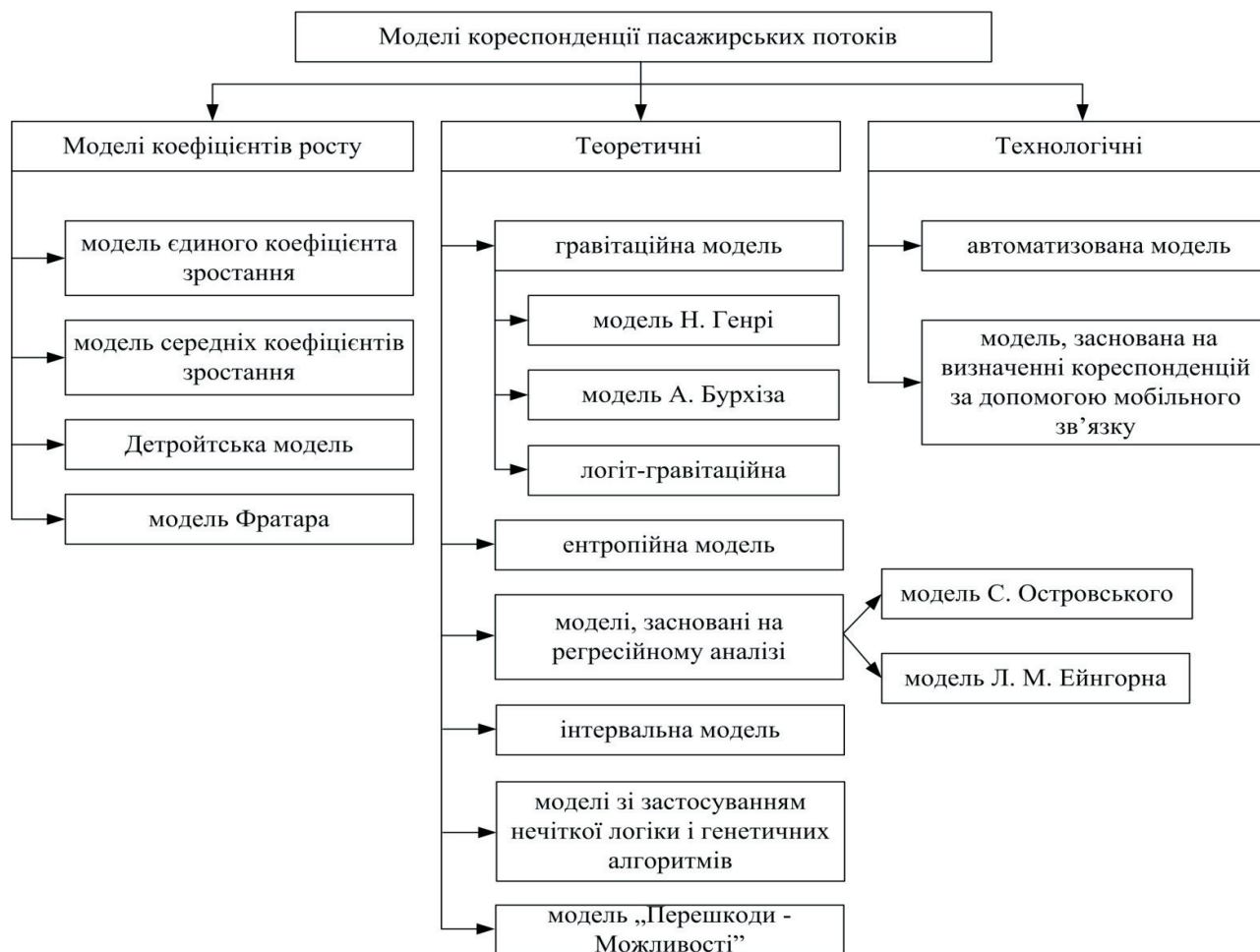


Рис. 1. Моделі розрахунку обсягів кореспонденцій пасажирських потоків

### 3. Аналіз існуючих моделей та визначення переваг та недоліків

Моделі коефіцієнтів росту ґрунтуються на використанні даних обстеження існуючого стану розподілу потоків пасажирів і транспорту між кореспондуючими районами із застосуванням для прогнозуючих розрахунків пропорційних коефіцієнтів зростання. У якості вихідних даних для таких моделей використовуються як матриці найкоротших відстаней, так і пасажиропотоки на вулично-дорожній мережі міста [13, 14].

Основні моделі цього класу наступні [1, 3, 15, 16]:

1) модель єдиного коефіцієнта росту – не враховує динаміку розвитку співвідношень між окремими параметрами міста, використовується рідко через грубі похибки;

2) модель середніх коефіцієнтів росту - для розрахунків використовуються середні коефіцієнти росту для кожного з транспортних районів, майже не застосовується на практиці;

3) Детройтська модель – враховує середні коефіцієнти росту для кожного з транспортних районів, а також коефіцієнт росту для всього міста, не складний для розрахунків;

4) модель Фратара – найбільш поширена серед всіх моделей цього класу.

Складність моделей коефіцієнтів росту полягає у великій кількості фінансових та людських витрат, що задіяні не лише для збору даних, але і для обробки одержаних результатів. В загальному, такі моделі використовуються при незначних темпах зростання міст і термінах прогнозу не більше 5–7 років. Заснований на використанні даних обстежень в існуючих умовах та застосуванні для розрахунків пропорційних коефіцієнтів, даний підхід не набув широкого розповсюдження [1, 15].

Теоретичні моделі ґрунтуються на емпіричних або теоретичних залежностях двох районів, чисельності їх населення, умов поїздок та найбільш поширені в перспективному плануванні розвитку транспорту [1, 7, 17–19].

До них належать гравітаційні та ентропійні моделі, моделі, засновані на регресійному аналізі, інтервальне моделювання, методи із застосуванням нечіткої логіки та генетичних алгоритмів, модель «Перешкоди-можливості».

У сучасній практиці для розрахунку транспортних кореспонденцій між районами міста найбільше поширення отримали різні типи гравітаційних моделей (модель Н. Генрі, модель А. Бурхіза, логіт-гравітаційна) [8].

Такі моделі базуються на аналогії з законом всесвітнього тяжіння. В них величини кореспонденцій

прямо пропорційні обсягам відправлень з одного транспортного району і прибуття в інший, і обернено пропорційні відстані між ними. Для цього визначають ємкість транспортних засобів і витрати часу на пересування.

У загальному вигляді гравітаційну модель розрахунку МК можна представити так [3, 9, 20, 21]:

$$h_{ijk} = \frac{HO_i \cdot HP_{jk} \cdot k_{jk} \cdot D_{ij}}{\sum_{j=1}^n (HP_{jk} \cdot k_{jk} \cdot D_{ij})}, \quad (1)$$

де  $h_{ijk}$  – кореспонденція між районами  $i$  і  $j$  на ітерації  $k$ ;  $HO_i$  – обсяг відправлень з  $i$ -го центроїда, авт./год.;  $HP_j$  – обсяг прибуття в  $j$ -й центроїд, авт./год.;  $D_{ij}$  – функція тяжіння між  $i$ -м та  $j$ -м центроїдами;  $K_j$  – коефіцієнт балансування;  $n$  – кількість центроїдів мережі.

Очевидною перевагою гравітаційних моделей є доступність вихідної інформації (кількість мешканців, відстань між містами чи районами), простота виконання розрахунків та реалізації, а одним із головних недоліків – неврахування індивідуальних уподобань населення.

В ентропійній моделі при розрахунку виходять з імовірнісного опису руху автомобілів – реалізований стан системи має найбільшу статистичну вагу, що відбиває порівняльні ймовірності реалізації різних станів у системі. Використання даного методу для прогнозування кореспонденцій мережі пов'язано зі значними обсягами спостережень й подальшим виявленням закономірностей функціонування транспортних потоків.

Значення кореспонденції визначається за принципом максимізації ентропії, який припускає, що система з найбільшою ймовірністю приймає максимальньо стійкий стан з мінімумом внутрішньої енергії, що можливо лише при максимумі ентропії [13, 22]:

$$S = \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot \ln(h_{ij}) \right) \rightarrow \max, \quad (2)$$

де  $S$  – ентропія системи;  $n$  – кількість транспортних районів в місті, од.;  $h_{ij}$  – значення кореспонденції між районами відправлення  $i$  та прибуття  $j$ .

Перевагами ентропійних моделей є доступність вихідної інформації і простота виконання розрахунків.

Недоліком таких методів є низька точність результатів, оскільки вони потребують калібрування; формування матриці відбувається на основі одного значущого критерію, в той час як задача визначення попиту на пересування є багатокритеріальною [23].

Поряд з найбільш поширеними гравітаційними та ентропійними моделями в закордонній практиці знайшли застосування й інші імовірнісні методи розрахунку, зокрема модель, що використовує методи регресійного аналізу. Регресійний аналіз дає можливість ввести в розрахунок додаткові незалежні змінні, які дозволяють врахувати не лише населення району, дальність пересування, а й показник використання території та рівень автомобілізації. До

таких моделей відносять [8]: модель С. Островського (враховуються такі фактори, як відстань між зонами, чисельність населення, рівень автомобілізації, кількість працівників), модель Л. М. Ейнгорна (використовуються розміри місць прикладання праці, проживання працюючих, час пересування, поява нових трудових зв'язків), ін.

Перевагою таких моделей є врахування ними показника використання території і рівня автомобілізації. Очевидними недоліками є великий обсяг вхідних даних та зниження точності прогнозу із збільшенням тривалості етапу розрахунку.

Для прогнозування попиту на перевезення також можуть успішно використовуватися моделі, що ґрунтуються на застосуванні нечіткої логіки і генетичних алгоритмів [24]. Дослідження кореспонденцій, проведених за таким методом, показують високу якість результатів; відмінності між реальними і розрахунковими пасажиропотоками незначні. Недоліком такої моделі є суб'єктивний вибір функції належностей.

Для розрахунку транспортних кореспонденцій між районами міста також використовується модель «Перешкоди – Можливості».

Відповідно до моделі, вибір поїздки не залежить від відстані, але залежить від рівня задоволення мети поїздки [25]:

$$T_{ij} = T_i \left( e^{-LT} - e^{-LT(T+T_i)} \right), \quad (3)$$

де  $T_{ij}$  – кількість поїздок з зони  $i$  в зону  $j$ ;  $T$  – кількість поїздок, що є ближчими за часом здійснення до зони  $i$ , ніж до зони  $j$ ;  $T_i$  – кількість поїздок, що завершуються в зоні  $i$ ;  $T_j$  – кількість поїздок, що завершуються в зоні  $j$ .

Основною перевагою такої моделі є те, що вона не вимагає даних походження-призначення кореспонденцій, суттєвими недоліками – довільний вибір коефіцієнта ймовірності, відсутність відповідного програмного забезпечення, врахування лише відносних змін взаємозв'язку часу та відстані між зонами.

Уваги заслуговує інтервальна концепція визначення попиту на послуги пасажирського транспорту, що ґрунтується на гіпотезі про випадковий характер вибору суб'єктами напрямків пересувань (гіпотеза обґрунтована дослідженнями щодо вибору людиною робочого місця) [26–28].

Запропоновано також автоматизований метод обстеження кореспонденцій та пасажиропотоків, що дозволяє вивчити попит населення на перевезення, прогнозувати кореспонденції з урахуванням факторів рухомості населення, моделювати процес вибору пасажиром оптимальних маршрутів, застосовувати автоматизовані методи збору та обробки інформації [29, 30].

Спосіб автоматизованого обстеження дозволяє підвищити достовірність та ефективність процесів обстеження пасажиропотоків за рахунок застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій.

Переваги та недоліки моделей визначення кореспонденцій пасажирських потоків наведено у табл. 1.

Таблиця 1

## Характеристика моделей визначення обсягів кореспонденцій переміщень

Модель	Переваги	Недоліки
коефіцієнтів росту	- простота розрахунків	- не враховують динаміку розвитку структури міста; - вимагають інформацію про існуючий розподіл поїздок; - трудомісткі обстеження
гравітаційні	- достовірність і стійкість отриманих показників для укрупнених розрахунків; - доступність вихідної інформації; - простота розрахунків	- неврахування індивідуальних потреб населення; - використання кількості поїздок як основного фактора
ентропійні	- доступність вихідної інформації; - простота розрахунків	- низька точність результатів; - формування матриці на основі одного критерію
засновані на регресійному аналізі	- враховують показник використання території і рівень автомобілізації	- точність прогнозу знижується із збільшенням тривалості етапу розрахунку; - розрахунки слід коректувати кожні 7-10 років; - великий обсяг вхідних даних
із застосуванням нечіткої логіки і генетичних алгоритмів	- висока якість результатів	- суб'єктивний вибір функції належностей
«Перешкоди - Можливості»	- створена для кращого наслідування реальних потоків; - не вимагає даних походження-призначення кореспонденцій	- враховує лише відносні зміни взаємозв'язку часу та відстані між зонами; - довільний вибір коефіцієнта ймовірності; - відсутність відповідного програмного забезпечення
Технологічні	- достовірність і ефективність процесів обстеження; - скорочення трудомісткості вирішення задач	- часткове охоплення користувачів пасажирського транспорту; - часткове охоплення території; - відносно висока вартість обладнання

## 4. Висновки

Внаслідок проведеного аналізу встановлено основні вимоги до моделей пасажирських кореспонденцій:

- гнучкість (можливість введення додаткових параметрів для врахування змін транспортної ситуації в містах),
- універсальність (можливість описувати різні типи поїздок),
- відносна простота (широке застосування в різних умовах проектування з використанням обчислювальної техніки та без неї).

В плані мінімізації необхідних ресурсів для збору вихідних даних та простоти проведення розрахунків якісно виділяються моделі визначення обсягів переміщень із застосуванням нечіткої логіки. За структурою такі моделі представляють собою «чорну скриньку», яка дозволяє швидко подавати певним чином сформовані вхідні дані та отримувати результати.

Окремо слід зазначити ефект навчання, який присутній в моделях цього класу.

Тобто, в процесі виконання розрахунків модель змінює свої параметри для підлаштування під реальні взаємозалежності. В цьому ж позитивному ефекті криється і основний недолік цих моделей, а саме певна суб'єктивність у виборі параметрів функцій належності. Математичний апарат генетичних алгоритмів дозволяє звести до мінімуму втручання в процес налаштування параметрів моделі та заснувати його за принципом змагання.

Генетичні алгоритми дозволяють відсіювати гірші результати параметрів моделі та виробляти кращі взірці в процесі еволюції.

Зважаючи на все вище викладене, алгоритми визначення обсягів кореспонденцій з застосуванням теорії нечіткої логіки в парі з генетичними алгоритмами пошуку оптимальних параметрів потребують додаткового вивчення та розробки.

## Література

1. Norbert, Oppenheim Urban Travel Demand Modeling [Text] / Oppenheim Norbert. – John Wiley and Sons, 1995. – 480 p.
2. Public Transport Assignment [Text]. - Department for Transport, Transport Analysis Guidance. – London, 2013. – 23 p.
3. Брайловский, Н. О. Моделирование транспортных систем [Текст] / Н. О. Брайловский, Б. И. Грановский. – М.: Транспорт, 1978. – 124 с.
4. Гецович, Е. М. Корикування матриці транзитних транспортних кореспонденцій у центральних частинах міст [Текст] / Е. М. Гецович, Д. В. Засядько, В. М. Панін // Весник ХНАДУ. – 2013. – вып. 61-62. – С. 60-63.
5. Ortuzar, J. de D. Modelling transport. Third edition [Text] / J. de D. Ortuzar, L. G. Willumsen. – John Wiley & Sons Ltd., 2006. – 499 p.
6. Sheffy, Y. Urban Transportation Networks. Equilibrium Analisis with Mathematical Programming Methods [Text] / Y. Sheffy. – Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1995. – 400 p.

7. Лагереv, Р. Ю. Методы восстановления матриц корреспонденций по данным загрузки сети [Текст] / Р. Ю. Лагереv // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. – Иркутск: ИИТМ ИРГУПС. – 2005. – Вып. 3. – С. 111-115.
8. Лобашов, О. О. Моделивання впливу мережі паркування на транспортні потоки в містах [Текст]: монографія / О. О. Лобашов. – Харків ХНАМГ, 2010. – 169 с.
9. Любий, Є. В. Закономірності розподілу маршрутних кореспонденцій у малих містах [Текст] / П. Ф. Горбачов, Є. В. Любий, О. Л. Гаврилишина, А. В. Сіромолот // Вісник СНУ ім.В. Даля: наук.журнал. – 2011. - №5 (159). – С. 89-94.
10. Любий, Є. В. Метод обстеження пасажиропотоків у малих містах [Текст] / Є.В. Любий // Зб. наук.праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 99. – С. 161-167.
11. Daamen, Winnie Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities [Text] / Winnie Daamen. – Trail Thesis Series, T2004/6, The Netherlands TRAIL Research School, 2004. – 377 p.
12. Россолов, А. В. Закономерности формирования спроса на услуги городского пассажирского транспорта [Текст] / А. В. Россолов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – 2013. – Т.4, №3/64. – С. 8-10.
13. Россолов, О. В. Моделивання попиту на послуги міського пасажирського транспорту при проведенні масових заходів у містах [Текст] / О. В. Россолов, Є. В. Любий, В. Ю. Король, О. С. Левченко. – Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 3, № 3/63. – С. 22–25.
14. Лозе, Д. Моделирование транспортного предложения и спроса на транспорт для пассажирского и служебного транспорта – обзор теории моделирования [Текст] / Д. Лозе // Сб. докладов 7-й межд. конф. «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах». – СПб: СПб. гос. архит.-строит. ун-т. – 2006. – С. 170-186.
15. Погребняк, Е. Б. Анализ методов формирования матрицы корреспонденций транспортной сети города [Текст] / Е. Б. Погребняк, Н. И. Самойленко // Коммунальное хозяйство городов. – 2006. – № 69. – С. 121–126.
16. Fratar, T. J. Vehicular Trip Distribution by Successive Approximation [Text] / T. J. Fratar. – Traffic Quarterly, 1954. – № 8. – p. 53 – 65.
17. Россолов, А. В. Определение уровня вариативности матрицы пассажирских корреспонденций [Текст] / А. В. Россолов, Е. В. Любий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 1, N 4(61). – С.43-47.
18. Горбачов, П. Ф. Оцінка точності існуючих методів моделювання пасажирських кореспонденцій на прикладі малого міста [Текст] / П.Ф. Горбачов, Є. В. Любий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2010. – НТЖ, № 5-6. - С. 48-52.
19. Швецов, В. И. Математическое моделирование транспортных потоков [Текст] / В. И. Швецов // АиТ. – 2003. - №11. – С. 3-46.
20. Лобашов, А. О. Алгоритм распределения транспортных потоков в городах [Текст] / А. О. Лобашов, В. В. Лютый. – Автомобильный транспорт. – Харьков: ХГАДТУ, 2000. – С. 101–103.
21. Любий, Є. В. Критерій оцінки ефективності функціонування маршрутних мереж малих міст / Є.В. Любий // Автомобільний транспорт. – Харьков: РИОХНАДУ / Сб. научн. тр., вып. 24, 2009. – с. 109 -112.
22. Wilson, A. G. Entropy in Urban and Regional Modelling [Text] / A. G. Wilson. – London: Pion Limited, 1970. – 250 p.
23. Горбачев, П. Ф. Моделирование спроса на услуги пассажирского маршрутного транспорта в крупных городах [Текст]: монография / П. Ф. Горбачев, А. В. Россолов. – Х.: ХНАДУ, 2012. – 152 с.
24. Kalis, M. Trip distribution modeling using fuzzy logic and a genetic algorithm [Text] / M. Kalis, D. Teodorovic // Transportation Planning and Technology. – 2003. – Vol. 26, № 3. – P. 213–238.
25. Samuel, A. Stouffer Intervening Opportunities: A Theory Relating Mobility and Distance [Text] / A. Stouffer Samuel // American Sociological Review. –1940. – Vol. 5, № 6. – P. 845–867.
26. Горбачев, П. Ф. Интервальное моделирование спроса на трудовые передвижения в крупнейших городах [Текст] / П. Ф. Горбачев, А. В. Россолов, К. В. Костенко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2011. – №159. – С. 248–253.
27. Горбачов, П. Ф. Нова концепція моделювання потреб населення у трудових пересуваннях міським пасажирським транспортом [Текст] / П. Ф. Горбачов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009.– № 27. –С. 210 – 214.
28. Любий, Є. В. Формування моделі попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом [Текст] / Є. В. Любий, О. В. Россолов // Комунальне господарство міст. – 2013. - № 107. – С. 422-426.
29. Маруніч, В. С. Автоматизований метод обстеження кореспонденцій та пасажиропотоків на маршрутах транспорту загального користування [Текст] / В. С. Маруніч, І. М. Вакарчук, В. С. Харута. – Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. – 2012. – № 103. – С. 343–351.
30. Amini, A. The Differing Tribal and Infrastructural Influences on Mobility in Developing and Industrialized Regions [Text] / A. Amini, K. Kung, C. Kang. – Mobile Phone Data for Development, 2013. – 849 p.