

УДК 711.11

к.т.н., професор Осетрін М.М.,
Беспалов Д.О., Дорош М.І.,

Київський національний університет будівництва та архітектури

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ СТВОРЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ МОДЕЛІ МІСТА

Приводяться основні принципи створення і роботи транспортної моделі міста.

Ключові слова: транспортна модель, транспортний попит, транспортна пропозиція, транспортний район, шар попиту.

Темпи розвитку сучасних міст, постійне зростання автомобілізації призводять до загострення цілого ряду проблем, таких як створення раціональної організації дорожнього руху, розміщення паркувальних місць, забезпечення якості дорожніх покриттів, та охорони навколишнього середовища. Вирішення зазначених проблем вимагає «правильного», системного управління, ефективної організації транспортних потоків і оптимального планування транспортної інфраструктури.

Для управління транспортною системою та прийняття оптимальних рішень в галузі транспортного планування необхідні конкретні системні знання про існуючу транспортну ситуацію і можливі сценарії її розвитку.

«Неможливо управляти тим, що не можна виміряти» (Том Демарко), можна сказати, що відсутність кількісного опису транспортної ситуації значно ускладнює і без того складний вибір між варіантами розвитку міської транспортної системи. Ліквідація різниці між бажаним і реальним результатом може бути досягнута за допомогою сучасних інструментів планування та оцінки наслідків прийнятих рішень, а саме єдиної транспортної моделі міста.

Як показує досвід, транспортна модель міста, що використовується для підтримки прийняття управлінських рішень при стратегічному транспортному плануванні, є оптимальним інструментом для кількісної оцінки пропонованих варіантів розвитку транспортної мережі, їх подальшого порівняння та обґрунтованих висновків про доцільність інвестицій у проекти з розвитку транспортної інфраструктури.

Транспортні моделі, побудовані на сучасних інформаційних технологіях представляють собою наймогутніші обчислювальні програмні комплекси, які на основі функціонально-просторових характеристик міста в сукупності з усіма наявними даними про транспортний попит і пропозицію розраховують найімовірніший розподіл транспортних і пасажирських потоків по вулично

дорожній мережі. Ці розрахунки потім лягають в основу прогнозів розвитку міста та є необхідною аналітичною базою для прийняття рішень з розвитку транспортної інфраструктури міста.

«Правильне» стратегічне управління транспортною системою міста, крім усього іншого, безпосередньо впливає на якість транспортного обслуговування населення та безпеку дорожнього руху.

Головним достоїнством транспортних моделей є те, що вони дозволяють експериментувати не з людьми, а лише з комп'ютерним поданням їх щоденної поведінки.

Світовий досвід створення транспортних моделей. Сучасні інструменти моделювання

Транспортні моделі, засновані на принципах комп'ютерного моделювання розподілу транспортних потоків, вперше створені в 1960 р. Однією з перших програм, що реалізують чотирьох ступеневу процедуру прогнозування завантаження транспортних мереж, була програма EMME (Equilibre Multimodal, Multimodal Equilibrium), що означає «мультимодальна рівновага»), розроблена і застосована для міста Монреаль (Канада).

Бурхливий розвиток обчислювальних потужностей сучасних комп'ютерів дозволив за останні роки в десятки разів прискорити основні обчислювальні процедури, істотно уточнити і деталізувати моделі транспортних мереж міст, врахувати в розрахунках набагато більшу кількість різних факторів, що визначають поведінку сучасних учасників дорожнього руху.

На сьогоднішній день в світі існують десятки програмних продуктів для макро-моделювання транспортних потоків, наприклад Tmodel2, Cube, Emme/4, Transcad, Transnet, Visum.

За допомогою цих програмних комплексів побудовані транспортні моделі в таких містах, як Нью-Йорк, Лос-Анджелес, Лондон, Париж, Мілан та інші. Побудована модель транспортної мережі майже всієї Європи від кордонів СНД до Атлантичного океану.

Самою докладною (з найбільшою кількістю елементів) транспортною моделлю в світі є транспортна модель Німеччини, виконана в PTV Vision VISUM. Крім того, розроблена транспортна модель Швейцарії що включає також сусідні країни Європи в якості зовнішніх районів.

За останні роки кілька російських та два українських міста розробили транспортні моделі з використанням програмного забезпечення PTV Vision VISUM і зараз успішно їх експлуатують. Серед них Москва, Санкт -Петербург, Перм, Самара, Томськ, Астрахань, Барнаул, Вологда, Львів, Івано-Франківськ.

Структура транспортної моделі

Транспортна модель в цілому являє собою програмний комплекс, що складається з інформаційних і розрахункових блоків.

Інформаційні блоки складають єдину базу даних, призначену для зберігання та обробки інформації, необхідної для розрахунку транспортних потоків. Розрахункові блоки реалізують алгоритми розв'язання задач математичного програмування, орієнтованих на розрахунок потреби в пересуваннях і транспортних потоків.

Виходячи з цього, створення основи моделі і наповнення її вихідними даними можна розділити на два незалежних один від одного етапу – це створення транспортної пропозиції та створення (розрахунок) транспортного попиту (рис.1).



Рис.1 Етапи створення транспортної моделі

Транспортна пропозиція складається з елементів, за допомогою яких транспортна система міста задовольняє існуючий транспортний попит.

Транспортний попит кількісно і якісно визначає потребу мешканців міста в переміщенні.

Транспортна пропозиція:

- Картографічна інформація (цифровий план міста, топографічна карта);
- Мережа шляхів руху для різних видів транспорту, її властивості і умови руху, включаючи технічні засоби організації дорожнього руху;
- Типи вулиць і доріг, середньорічна добова інтенсивність, пропускна здатність перегонів і перехресть і т.д.

Транспортний попит:

- Дані статистики: відомості про населення, працездатне населення, робочі місця, робочі місця у сфері послуг, кількість студентів, і навчальних місць;
- Дані статистики про розподіл кореспонденцій по цілях поїздки;
- Дані про загальний поділ транспортних потоків за видами транспорту на досліджуваній території [1].

Етапи створення транспортної моделі міста.

Транспортна модель пропозиції

Транспортна модель пропозиції включає в себе модель пропозиції індивідуального та громадського транспорту.

Транспортна пропозиція індивідуального транспорту, складається з перехресть (вузлів) і перегонів (ділянок доріг між перехрестями).

Вузли – точки перетину транспортних комунікацій (магістралей, трамвайних шляхів), призначення яких полягає в модельному поданні перехресть (рис.1). Кожному відрізку однозначно відповідає пара вузлів. Відповідно, в число атрибутів кожного вузла входять ідентифікатори відрізків, відповідних даному вузлу, а також бінарні змінні, що показують, чи є даний вузол початком або кінцем даного відрізка.

Для кожного вузла задаються відповідні атрибути (номер, тип, ім'я, пропускну здатність, регулювання у вузлі, додаткові значення).

Відрізки пов'язують вузли і відображають геометрію транспортної мережі. Для кожного відрізка вказуються відповідні атрибути (номер, назва, тип, пропускну спроможність, кількість смуг, швидкість, дозволені системи транспорту). Статистичні дані для вузлів та відрізків отримуються з різних інформаційних джерел. Характеристики відрізка в прямому і зворотному напрямках руху задаються окремо.

Транспортна пропозиція міського пасажирського транспорту (МПТ) складається з зупиночних пунктів, маршрутів руху та розкладу (інтервалів) руху. Маршрути руху МПТ проходять по існуючим відрізкам і вузлам через задані зупиночні пункти (рис.2).

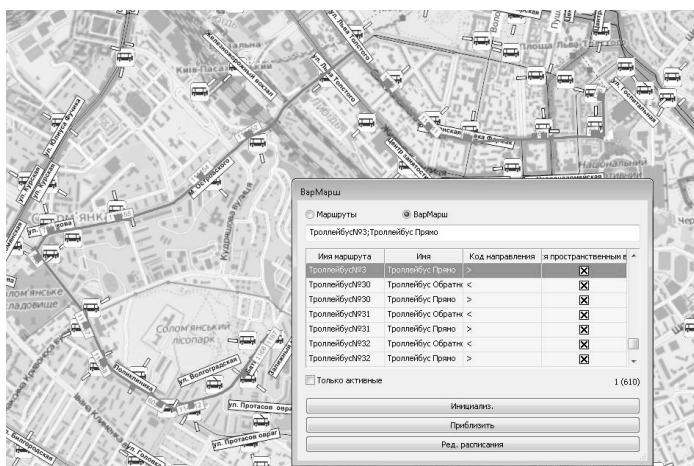


Рис.2. Маршрути руху МПТ в програмному комплексі

Інформація про зупиночні пункти, маршрути руху та розкладу руху МПТ (рис.3) отримуються з різних джерел інформації і заносяться в програмний комплекс.

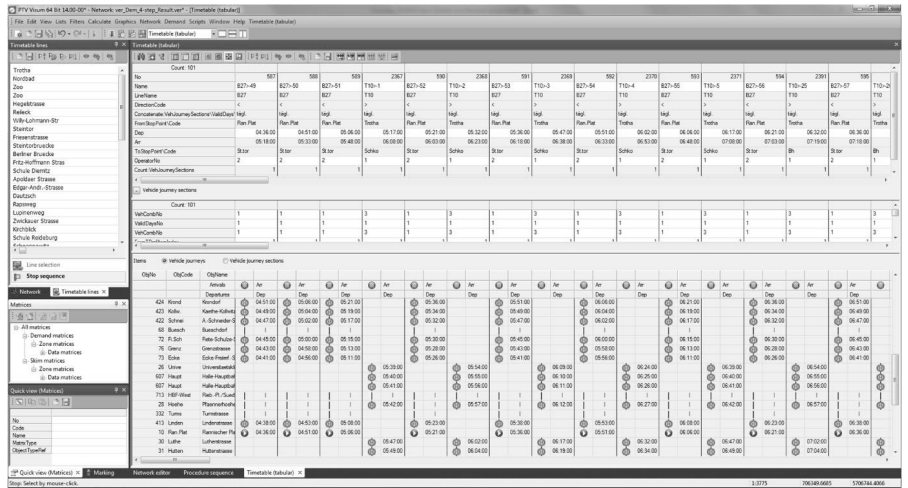


Рис.3. Розклад руху в програмному комплексі

Транспортна модель попиту

Побудова моделі транспортного попиту можлива при формалізації досліджуваної території. Вся досліджувана територія поділяється на певну кількість областей, що називаються транспортними районами.

В якості районів виступають умовно відокремлені територіальні утворення, підібрані з урахуванням порівняльної ідентичності в плані соціальних і економічних показників всередині даних районів (рис.4). Кожен транспортний район містить статистичну інформацію про населення, працездатне населення, робочі місця, робочі місця у сфері послуг, кількість студентів, кількість навчальних місць та ін. (табл.1).

Соломський район	№ транспортного району	Види діяльності																												
		Назва адміністративного району	Назва транспортного району	Населення транспортного району	Робочі місця	Робочі місця в сфері послуг	Місця в дитячих дошкільних установах	Дошкільна освіта	Навчальні місця в школах	Школи	Навчальні місця в ВУЗах	Студенти	Складське господарство, лісове (а);	Рибальство (а);	Горнодобувальна промисловість і розробка (а);	Обробна промисловість (а);	Електроенергія, газ і водопостачання (а);	Видатництво (а);	Оптова та роздрібна торгівля (а);	Готелі та ресторани (а);	Транспорт, складське господарство та зв'язок (а);	Фінансова діяльність (а);	Діяльність з нерухомим майном та фінансові (а);	Державне управління та оборона (а);	Освіта (а);	Охорона здоров'я та соціальні послуги (а);	Діяльність по наданню комунальних, соціальних і персональних послуг (а);	Діяльність по відношенню до приватних домогосподарств з найманим побутовим персоналом	Діяльність екстериторіальних організацій (а);	
43		44483	26245	26133	19976	739	1243	1132	1132	19802	17018	344	5	0	806	875	1037	2951	528	2661	1772	4085	2260	2593	1870	1256	0	0		

Табл.1. Приклад даних статистики по транспортному району



Рис.4. Фрагмент транспортного районування м. Київ

Транспортні райони взаємодіють з ВДМ на основі примикань (рис.5).

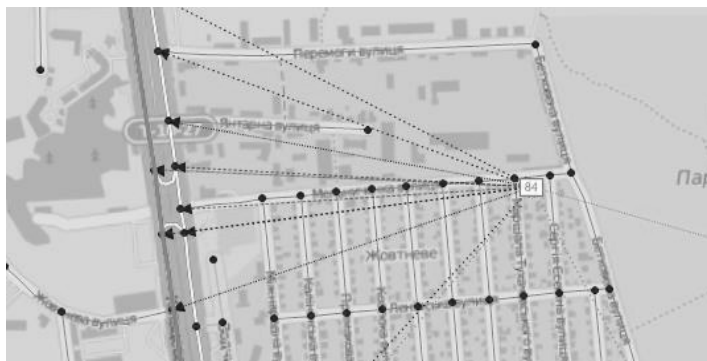


Рис.5. Фрагмент примикань транспортних районів до ВДМ міста.

Дані для розрахунку транспортного попиту

Для розрахунку транспортного попиту необхідні дані про транспортну рухомість населення. Збір даних базується на опитуванні респондентів, розподілених по території міста згідно з принципами квотної вибірки відповідно до просторового розподілу населення та його статеві - вікової структури.

Опитування проводиться на основі спеціально розробленої анкети [8].

При опитуванні жителів повинні бути отримані відповіді на питання:

- хто здійснює поїздку;
- з якою метою;
- звідки і куди поїздка відбувається;
- коли поїздка починається і закінчується;
- які транспортні засоби використовувались.

На основі опитування формується ланцюжок пересувань респондента за добу.

Прикладом типового ланцюжка переміщень або прикладом зміни людської діяльності впродовж дня є ряд послідовної активності Д-Р-М-Д (Дім – Робота – Магазин – Дім), з якого утворюються однорідні переміщення Д-Р (Дім – Робота), Р-М (Робота – Магазин), М-Д (Магазин – Дім), що в свою чергу, можуть бути як початком, так і кінцем цього переміщення тобто джерелом-ціллю переміщенням.

У місті існує велика кількість видів діяльності, які утворюють відповідний обсяг переміщень і мають джерело та ціль. Тому для спрощення розрахунку попиту на транспорт (що не впливає на точність його результатів) такі зв'язки, а відповідно види діяльності, узагальнюються. Для транспортної моделі міста сформовано 10 найхарактерніших видів діяльності (шарів попиту): Дім – Робота, Дім – Навчання, Дім – Інше, Навчання – Дім, Робота – Дім, Робота – Робота, Робота – Інше, Інше – Дім, Інше – Робота, Інше – Інше, та визначені джерела та цілі поїздки (табл.2).

Табл.2.

Джерела і цілі поїздки по шарах попиту

Шари попиту	Джерело поїдки (РО _{утв.})	Ціль поїдки (РО _{прит.})
Дім – Робота	Працююче населення	Місця прикладання праці
Робота – Дім	Місця прикладання праці	Працююче населення
Дім – Інше	Працююче населення	Місця прикладання праці в сфері послуг
Інше – Дім	Місця прикладання праці в сфері послуг	Працююче населення
Робота – Інше	Місця прикладання праці	Місця прикладання праці в сфері послуг
Інше – Робота	Місця прикладання праці в сфері послуг	Місця прикладання праці
Робота – Робота	Місця прикладання праці	Місця прикладання праці
Інше – Інше	Місця прикладання праці в сфері послуг	Місця прикладання праці в сфері послуг
Дім – Навчання	Учні	Навчальні місця
Навчання – Дім	Навчальні місця	Учні
Навчання – Інше	Навчальні місця	Місця прикладання праці в сфері послуг
Інше – Навчання	Місця прикладання праці в сфері послуг	Навчальні місця

З опитувань населення, визначаються кількість переміщень по шарах попиту.

Розрахунок транспортного попиту

В програмних комплексах представлені 3 альтернативні моделі розрахунку попиту:

1. Чотириохступенева модель.
2. Модель EVA
3. Модель VISEM

Для розрахунку попиту в транспортних моделях міст найчастіше використовуються класична чотириохступенева модель. В роботі такої моделі можливо виділити чотири етапи (рис.6):

1. Генерація попиту;
2. Розподіл попиту;
3. Вибір режиму;
4. Перерозподіл

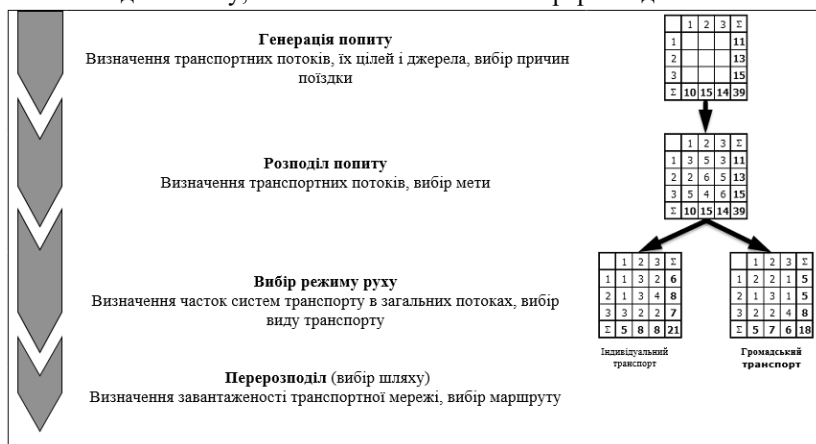


Рис.6. Етапи розрахунку транспортного попиту

2) Розподіл транспортного попиту



Рис.7. Схема розподілу транспортного попиту

На основі транспортної пропозиції розраховуються витрати на здійснення кореспонденцій, тобто розраховуються матриці затрат. На основі обсягів згенерованого попиту і матриць затрат відбувається розподіл попиту, тобто розраховуються матриці кореспонденцій для кожного шару попиту відповідного транспортного району.

Розподіл шарів попиту відбувається на основі функції оцінки (оцінки ймовірності здійснення переміщення з району i в район j). Функція оцінки визначається для кожного шару попиту на основі опитування населення міста про дальність (ймовірність) і середній час поїздки (рис.7).

В транспортних моделях міст на етапі розподілу попиту використовується такі основні функції оцінки: Logit, Kirchoff, Вох-Сох, Комбіновано, виду:

$$f(U_{ij}) = e^{(c \cdot U_{ij})} - \text{Logit функція};$$

$$f(U_{ij}) = a \cdot U_{ij}^b \cdot e^{(c \cdot U_{ij})} - \text{функція Комбіновано};$$

$$f(U_{ij}) = U_{ij}^c - \text{функція Kirchoff};$$

$$f(U_{ij}) = \frac{1}{U_{ij}^b + c \cdot U_{ij}^a} - \text{функція TModel};$$

$$f(U_{ij}) = e^{\left(\frac{U_{ij}^b - 1}{c} \right)} - \text{функція Вох-Сох};$$

де $f(U)$ – ймовірність здійснення кореспонденції з затратами U ;

U_{ij} – затрати на здійснення кореспонденції з району i в район j , хв;

a, b, c – коефіцієнти.

Функція оцінки типу «Комбіновано», представлена на рис.8. По горизонтальній осі відкладається час, що витрачається на здійснення транспортної кореспонденції, по вертикальній осі – ймовірність здійснення такої кореспонденції.

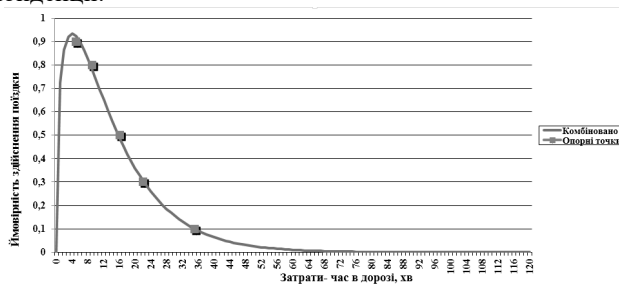


Рис.8. Графік функції оцінки типу «Комбіновано»

Модель транспортної поведінки людей, основу якої становить функція оцінки, має незалежні параметри – коефіцієнти функції (a, b, c). Значення коефіцієнтів отримуються з результатів опитувань населення (рис.9).

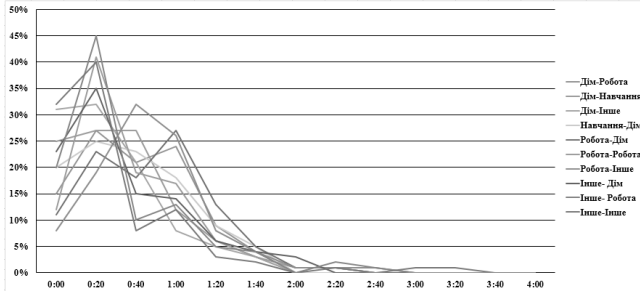


Рис.9. Графік розподілу шарів попиту за дальністю і середнім часом поїздки
(на основі опитування)

В результаті розрахунку процедури розподілу обчислюються матриці кореспонденцій для всіх шарів попиту.

3) Вибір режиму

Після розрахунку матриць кореспонденцій по шарах попиту, необхідно розділити ці матриці по режимам руху. Режим руху визначатиме спосіб реалізації кореспонденції – на індивідуальному (ІТ) або на громадському транспорті (ГТ).

Розподіл шарів попиту по режимам руху відбувається на основі функції оцінки: Logit, Kirchoff, Vox-Cox, Комбіновано, виду:

$$f(U_{ij}) = e^{(c \cdot U_{ij})} \text{ - функція Logit};$$

$$f(U_{ij}) = e^{\left(\frac{U_{ij}^b - 1}{b} \right)} \text{ - функція Vox-Cox}$$

$$f(U_{ij}) = U_{ij}^c \text{ - функція Kirchoff};$$

$$f(U_{ij}) = a \cdot U_{ij}^b \cdot e^{(c \cdot U_{ij})} \text{ - функція Комбіновано};$$

де $f(U)$ – ймовірність здійснення кореспонденції i в район j з затратами U ; U – затрати на здійснення кореспонденції з району i в район j на певному виді транспорту, хв.; a , b , c – коефіцієнти.

Функція оцінки визначається з опитування населення міста про дальність і середній час поїздки на певному виді транспорту (індивідуальному, громадському).

В результаті розрахунку, отримані матриці кореспонденції по всім режимам руху.

4) Перерозподіл транспортного попиту

Після того як отримані матриці кореспонденцій по шарах попиту, і вони розділені на види транспорту, якими будуть реалізовані, необхідно провести перерозподіл отриманих матриць кореспонденцій по транспортній пропозиції для вибору того чи іншого шляху реалізації цих кореспонденцій.

В результаті перерозподілу будується картограма пасажиропотоків маршрутів громадського транспорту (рис.10) та картограма інтенсивності транспортних потоків на ВДМ міста (рис.11), [3].

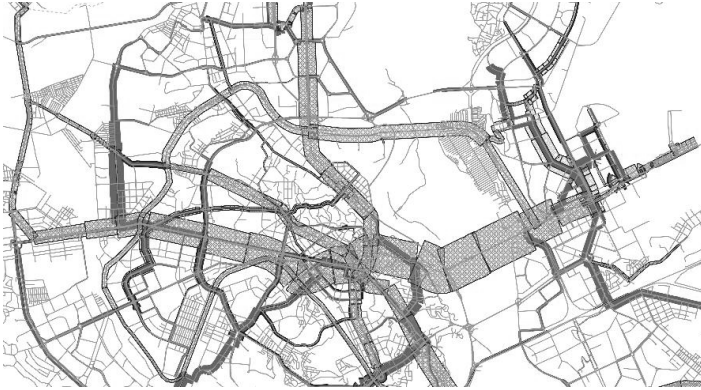


Рис.10. Картограма пасажиропотоків маршрутів громадського транспорту



Рис.11 Картограма інтенсивності транспортних потоків на ВДМ міста

Підвищення якості транспортної моделі

Заключний етап розробки транспортних моделей зводиться до вдосконалення і адаптації основних визначальних співвідношень, що характеризують закономірності перерозподілу транспортного попиту з урахуванням чинної транспортної пропозиції стосовно місцевих умов. Цей етап називається калібруванням моделі.

Процес калібрування моделі є одним з найважливіших етапів у створенні транспортної моделі. В процесі калібрування необхідно домогтися максимальної близькості результатів, отриманих на основі моделювання, і даних, зібраних в результаті проведених обстежень пасажирських потоків та інтенсивності транспортних потоків.

Література

1. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: монография / Якимов М.Р. – М.: Логос, 2013. – 188 с.
2. Математическое моделирование распределения транспортного спроса в транспортной системе города. Якимов М.Р. / Транспорт: наука, техника, управление. 2010. – №10. - С. 7–13.
3. Общий алгоритм работы четырёхшаговой транспортной модели. Якимов М.Р. / Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – № 1 (48). - С. 132–138.
4. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: Учебное пособие / А.В. Гасников и др – М.: МЦНМО.
5. Экспериментальная разработка транспортной модели в Санкт-Петербурге (на примере Василеостровского района). Беттгер К. Джерело електронного доступу: <http://old.ptv-vision.ru/assets/Uploads/data/publication-OleschenkoBoettger-JEksperimentalnaja-razrabotka-transportnoj-modeli.pdf>
6. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: Концепция разработки системы стратегического транспортного планирования для мегаполисов. Швецов В.Л., Калинина В.В., Беттгер К., Прохоров А. В., Джерело електронного доступу: <http://old.ptv-vision.ru/assets/Uploads/data/thesisBDD.pdf>
7. D. Ortuzar, G. Willumsen. Modelling Transport, 3rd Edition, London: 2006.
8. Анкета для опитування населення міста (<http://goo.gl/forms/Baz91ZIU2K>).

Аннотация

В статье приводятся основные принципы создания и работы транспортной модели города.

Ключевые слова: транспортная модель, транспортный спрос, транспортное предложение, транспортный район, слой спроса.

Annotation

The article describes main principles of creating and working transport model of the city.