

УДК 625.72

**Николаева Р.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [nikolaeva1@bk.ru](mailto:nikolaeva1@bk.ru)

**Логинова О.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [loginova@kgasu.ru](mailto:loginova@kgasu.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### Оптимизации сети автомобильных дорог

#### Аннотация

*Постановка задачи.* Цель исследования – определить критерии оптимальности и целевые функции, отражающие требования, предъявляемые к сети автомобильных дорог, и которые способствуют повышению эффективности работы транспорта.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в том, что определен общий принцип и условие построения оптимальной связующей дорожной сети. Наиболее полно удовлетворяющим условием оптимальности является минимум дорожно-транспортных затрат. Принцип оптимальности заключается в том, что всякая изолированная точка в оптимальной связывающей сети дорог соединяется со всеми остальными корреспондирующими точками звеньями, обеспечивающими наименьшие финансовые затраты на перемещение пассажиров и грузов из этой точки во все остальные корреспондирующие точки сети.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в минимизации финансовых затрат, связанных со строительством, содержанием и ремонтом дорожной сети и перемещения по ним транспортных средств.

**Ключевые слова:** сеть автомобильных дорог, автомобильный транспорт, корреспондирующие пункты, математическая модель, маршрут, оптимизация.

#### Введение

Наличие надежной и эффективной транспортной системы является важным фактором в развитии экономики любой страны. Доминирующим видом транспорта во всем мире является автомобильный, который ежегодно стремительно растет. О важности сети автомобильных дорог можно также судить по доле общего объема пассажирских и грузовых перевозок осуществляемых автомобильным транспортом. Исследования зарубежных ученых показали, что автомобильный транспорт является одним из крупнейших вкладов в бюджетные поступления. Например, налоги дорожных пользователей и сборы в США составили \$78 млрд. в 1994 году (6,2 процента федеральных доходов государственного бюджета) и в Соединенном Королевстве \$33 млрд. в 1995-96 (из которых только 10 миллиардов долларов было потрачено на дороги). Удельный вес транспортной системы в основных производственных фондах России составляет 27 %, а существенная доля транспортных услуг в валовом внутреннем продукте составляет 8 %. Чистые финансовые потоки от дорожной отрасли, как правило, положительно коррелирует с экономическим развитием [1].

Сеть автомобильных дорог (дорожная сеть) является сложной, крупномасштабной системой, которая предназначена для обеспечения круглогодичного безопасного движения [2]. Дорожная сеть является основой для функционирования экономики и общества посредством движения людей, товаров и услуг. Сегодня можно сказать о существующем дисбалансе между спросом в транспортной отрасли и предложениями в ней. Транспортные потоки в крупных городах достигают своих предельных значений, и падает пропускная способность дорог [3].

С экономической точки зрения построение дорожной сети должно базироваться на базовой топологии сети, спроса пользователей дорожной сети и стоимостью их строительства. Равновесие наступает тогда когда количество поездок между корреспондирующими пунктами отправления (например, место жительства, место

работы) и пунктами прибытия (местом работы, проживания) равны спросу на поездки с учетом стоимостной политики [4, 5].

Следствием трудности оптимизации дорожной сети можно отметить существующий дисбаланс между научными исследованиями и математическими расчетами, а также наблюдаемыми результатами. В последние годы были разработаны успешные математические и вычислительные методы по формулировке модели динамической транспортной системы. Многие из них обобщают традиционные статистические методы, передовые и реалистичные модели используют симулятор движения, динамику транспортного потока. К числу достаточно апробированных в развитых странах мира программных продуктов для динамических транспортных систем можно отнести: DYNASMART [6], Dynameq [7], AIMSUN [8]. Создания моделей транспортных систем в данных программах представляет собой довольно громоздкую задачу, которая предполагает наличие большого числа элементов и требует длительного процесса калибровка сотни или тысячи коэффициентов.

Цель настоящей статьи – представить сеть автомобильных дорог в виде математической модели и подобрать необходимые условия для оптимизации дорожной сети. Дорожную сеть представим в виде множества корреспондирующих точек (пункты отправления и прибытия), соединенных между собой набором маршрутов. Оптимизация дорожной сети сводится к решению множества одностомных задач, которые занимают решение оптимизации транспортного потока между двумя узлами по маршрутам и получить равновесные распределения транспортного потока в явном виде.

### **1. Фундаментальные решения, концепции и моделей дорожных сетей**

В дорожной сети ожидается, что каждый водитель попытается выбрать наиболее удобный маршрут, и этот выбор будет зависеть от задержек, которые водитель ожидает встретить на разных дорогах; но эти задержки, в свою очередь, будут зависеть от выбора маршрутов, сделанных другими. Такая взаимозависимость затрудняет прогнозирование последствий изменений в системе, таких как строительство новой дороги.

Модель дорожной сети способствует решению множества транспортных задач, которые заключаются в оптимизации транспортной сети при планировании, изменение организации дорожного движения для улучшения условий и т.п.

В 1952 г. Вардроп предложил два принципа равновесия транспортных потоков, которые заключаются в том, что любая транспортная система через определенное время приходит в равновесие [9]:

1. время передвижения по всем используемым маршрутам одинаково для всех участников движения, и меньше времени, которое потратит любой участник движения, изменив свой маршрут;

2. среднее время передвижения является минимальным.

Beckmann, McGuire, и Winsten (1956) впервые математически сформулировали эти условия. В частности, Specifically, Beckmann, McGuire, и Winsten (1956) установили эквивалентность между условиями равновесия транспортной сети, которые утверждают, что все пути, соединяющие пару корреспондирующих пунктов, будут иметь равное и минимальное время поездки (или расходы). Следовательно, в этом случае, равновесие транспортной сети может быть получено, путем решения задачи математического программирования [10]. Такой подход позволил сформулировать, проанализировать и затем решить транспортную задачу на основе фактических транспортных сетей.

Dafermos и Sparrow (1969) придумали термины для транспортной сети «оптимизация – пользователь» и «оптимизация – система». Данные термины различают две ситуации, в первой ситуации пользователи действуют в одностороннем порядке в своих собственных интересах при выборе маршрутов, во второй ситуации пользователи выбирают оптимальные маршруты с общественной точки зрения, с учетом минимальной стоимости в транспортной системе.

Традиционные методы транспортного планирования, включая методы проектирования сетей, сосредоточены на улучшении мобильности на основе таких параметров, как скорость и время в пути. Однако мобильно-ориентированный подход к планированию перевозки можно стимулировать спрос на поездки и привести к затору [11]. Хотя планирование

мобильности может повысить доступность сети, доступность планирования расширяет спектр возможных решений по сравнению с мобильно-ориентированной стратегией [12]. Одним из препятствий является отсутствие методов для решения проблемы доступности напрямую, а не мобильность в транспортировке конструкция сети.

В данной ситуации целью по оптимизации транспортной сети является определение кратчайшего расстояния между корреспондирующими пунктами. Дорожная сеть должна планироваться таким образом, чтобы минимизировать время в пути и финансовых затрат в транспортной системе.

Размещение, плотность и состав дорожной сети складывается под влиянием многочисленных факторов, которые условно можно разделить на три группы: экономические, социальные и природные. При проектировании автомобильных дорог учет этих факторов приводит к необходимости количественной оценки их влияния. Многообразие этих факторов затрудняет эту оценку. Возникает вопрос о выделении наиболее весомых факторов определяющих развитие дорожной сети. Для построения оптимального варианта сети дорог необходимо исследовать влияние каждого фактора на результат решения. Проводить такие исследования в реальных условиях невозможно, т.к. для этого вначале придется построить дороги и только потом провести сравнение. В таких случаях исследования можно проводить на математических моделях. Математическая модель позволит описать исследуемый процесс в виде уравнений и неравенств.

При создании математической модели дорожной сети необходимо в первую очередь определить критерий оптимальности и выбрать целевую функцию, которая отражает требования, предъявляемые к дорожной сети при проектировании.

## 2. Структура дорожной сети

Для описания структуры транспортной сети применяется теория графов, где транспортная сеть представляется в виде ориентированного графа, состоящего из множества последовательно пронумерованных вершин и множества последовательно пронумерованных ребер (дуг), символизирующих элементы и их связи. Граф  $G$ , моделирующий дорожную сеть, обязательно должен быть связанным, чтобы всегда был путь из любой вершины в любую другую вершину. Числа, характеризующие звенья такого графа, обычно выражают протяженность пути, время или стоимость проезда.

Введем обозначения:  $m$  – множество последовательно пронумерованных узлов графа  $G$ ;  $Z$  – множество последовательно пронумерованных дуг графа  $G$ ;  $I$  – множество узлов, являющихся пунктами отправления,  $i \subseteq m$ ;  $J$  – множество узлов, являющихся пунктами прибытия,  $j \subseteq m$ ; подразумевается, что  $i \cap j = \emptyset$ ;  $M_{ij}$  – множество маршрутов между пунктами отправления  $i \in I$  и пунктами прибытия  $j \in J$ .

Граф  $F$ , моделирующий дорожную сеть, определяется множеством вершин и множеством пар вершин, между которыми существует связь (рис. 1).

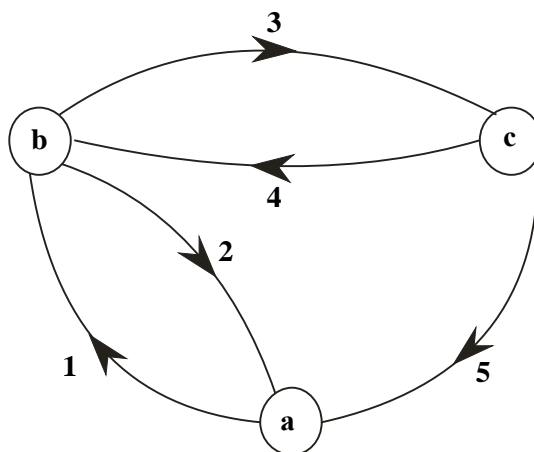


Рис. 1. Модель графа дорожной сети

Рис. 1 иллюстрирует набор из трех узлов, соединенных набором из пяти направленных связей. Мы можем представить узлы, как представляющие города, а связи как представляющие пропускную способность дорог между различными узлами. Двусторонняя дорога представлена двумя звеньями, по одному в каждом направлении. Например, от узла *c* существует два маршрута до узла *a*, водитель может выбрать:

- первый маршрут прямой, по связи 5 (маршрут *ca*);
- второй маршрут проходит через вершину *b* и использует две связи 4, 2 (маршрут *ca2*).

Пусть *Z* – множество звеньев сети дорог и пусть *R* – множество возможных маршрутов. Один из способов описания связи между звеньями сети и маршрутами – это матрица, определяемая следующим образом. Установим,  $A_{zr} = 1$ , если звено *z* лежит на маршруте *r*, и  $A_{zr} = 0$  в противном случае. Это определяет матрицу  $A = (A_{zr}, z \in Z, r \in R)$  называют звено-маршрут матрицы инцидентности. Каждый столбец матрицы соответствует одному из маршрутов *r*, а каждая строка – одному из звеньев *z* сети. Столбец для маршрута *r* состоит из 0 и 1: где 1 показывает, какие звенья сети находятся на маршруте *r*. Строки в матрице, где встречается 1 для звена сети *z*, показывает, какие звенья включены в заданный маршрут. Так, например, матрица инцидентности дорожной сети представленной на рис. 1 будет выглядеть следующим образом:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} ab & ac & ba & bc & ca1 & ca2 & cb1 & cb2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

Матрица инцидентности показывает столбец для каждого из двух маршрутов *ca1* и *ca2*, между узлом *c* и *a*. В столбцах закодирована следующая информация: маршрут *ca1* использует звено сети 5, а маршрут *ca2* пользуется звенья сети 4 и 2. Необходимо обратить внимание, что данная матрица инцидентности дорожной сети не сообщает порядок ссылок на маршруте.

Задача в данном случае заключается в том, чтобы решить: включать *k*-е звено в проектируемую сеть или не включать. Количество звеньев *k*-го типа неделимо и может принимать лишь два значения: 0 и 1. Определение неизвестных звеньев сети дорог ( $Z_k$ ), должно удовлетворять условию:

$$Z_k = 0; 1 \quad (k=1,2,3,\dots) \quad (2)$$

или

$$Z_k = \begin{cases} 1, & \text{если дуга } z \in Z \text{ "входит" в маршрут } M_{ij} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (3)$$

Предположим, в качестве критерия оптимальности принять минимум дорожных затрат (затраты на строительство, содержание и ремонт дорожной сети). В данном случае оптимальному варианту будет удовлетворять сеть с наименьшей общей протяженностью, для которых сумма дорожных затрат минимальна:

$$\sum_k D_k l_k = \min, \quad (4)$$

где  $D_k$  – дорожные затраты связанные со строительством, содержанием и ремонтом дорожной сети;

$l_k$  – длина участка дорожной сети;

$k$  – количество участков (звеньев дорожной сети).

Если к дорожной сети предъявляются требования по снижению расходов на транспортную работу или время нахождения в пути пассажиров или грузов, то необходимо обеспечить все транспортные связи самостоятельными дорогами по кратчайшему пути, т.е. непосредственное соединение между собой всех корреспондирующих точек (пункты отправления и прибытия). Решением поставленной задачи является определение неизвестных маршрутов между точками *i* и *j* ( $M_{ij}$ ), удовлетворяющих следующему условию:

$$M_{ij} \geq (i=1,2,3,\dots,m; j=1,2,3,\dots,m), \quad (5)$$

для которых, транспортная работа на маршруте  $ij$  ( $P_{ij}$ ) или время сообщения между  $i$  и  $j$  ( $t_{ij}$ ) будут минимальны:

$$\sum_i \sum_j P_{ij} = \min, \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_j t_{ij} = \min. \quad (7)$$

Учитывая сложность и практическую ограниченность численного программирования, при решении таких задач можно применять методы комбинаторного анализа, просмотр различных сочетаний значений переменных, но не всех, а лишь разумно выбранной части возможных сочетаний.

Осуществление перевозок с меньшими финансовыми затратами принятыми для оценки оптимальности при проектировании дорожной сети соответствует общему критерию оптимальности для экономики страны. Наиболее полно удовлетворяет условию оптимальности минимума финансовых затрат, изменяющихся с изменением начертания сети:

$$\sum_i \sum_j E_{ij} = \min, \quad (8)$$

где  $\sum_i \sum_j E_{ij}$  – суммарные финансовые затраты, т.е. затраты, связанные со строительством, содержанием и ремонтом дорог и с перемещением транспортных средств на направлениях  $ij$ .

Для выполнения требования (8) необходимо чтобы на каждом из направлений запроектированной сети был обеспечен возможный минимум финансовых затрат, т.е. чтобы:

$$\left. \begin{array}{l} E_{1-2} = \min; \\ E_{1-3} = \min; \\ \dots \\ E_{1-n} = \min; \\ \dots \\ E_{ij} = \min. \end{array} \right\} \quad (9)$$

Справедливость условия (9) может быть доказана следующим образом. Допустим, существует оптимальная сеть дорог, для которой:

$$\begin{array}{l} E_{1-2} = \min \\ E_{1-3} = \min \\ \dots \\ E_{1-n} = \min \\ \dots \end{array}$$

но

$$E_{ij} \neq \min.$$

Если заменить маршрут, для которого  $E_{ij} \neq \min$ , таким маршрутом, чтобы  $E_{ij} = \min$ , то сумма всех финансовых затрат на сети уменьшится на величину:

$$\Delta = E_{ij} - E'_{ij}, \quad (10)$$

и окажется, что:

$$\sum_i \sum_j E'_{ij} < \sum_i \sum_j E_{ij}. \quad (11)$$

Отсюда следует, что для рассматриваемого случая  $\sum_i \sum_j E'_{ij} \neq \min$  и первоначальное предложение об оптимальности дорожной сети, для которой хоть на одном маршруте  $E_{ij} \neq \min$ , является неверным.

Таким образом, в отличие от первоначального предложения дорожная сеть не может быть оптимальной, если не соблюдается неравенство (11).

Общий принцип построения оптимальной связывающей сети дорог заключается в том, что всякая корреспондирующая точка в оптимальной связывающей сети дорог соединяется со всеми остальными корреспондирующими точками звеньями, обеспечивающими наименьшие удельные дорожно-транспортные затраты на перемещение грузов из этой точки во все остальные корреспондирующие точки сети.

При составлении математической модели дорожной сети следует исходить из следующих ограничивающих условий:

– оптимальная сеть должна быть связующей, т.е. должна соединять все без исключения корреспондирующие точки (между каждой парой пунктов должен быть хотя бы один маршрут);

– по различным соображениям некоторое звено  $z_k$  должно быть исключено из построения оптимальной сети или, наоборот, обязательно включено в нее.

Это условие выражается равенством (2), при этом транспортно-эксплуатационный уровень проектируемой сети должен быть таким, чтобы скорость движения  $v_{ij}$  между пунктами  $i$  и  $j$  могла быть не менее некоторой заданной скорости  $\bar{v}_{ij}$ , интенсивность движения  $N_{ij}$  не более  $\bar{N}_{ij}$ , коэффициент безопасности движения  $K_{bij}$  не менее  $\bar{K}_{bij}$ .

На основании общего принципа задача сводится к отбору таких звеньев, при которых сформировались бы маршруты, обеспечивающие наименьшие удельные дорожно-транспортные затраты между двумя любыми корреспондирующими точками.

### Выводы

Цель оптимизации дорожной сети заключается в повышении эффективности работы транспорта. Наиболее полно удовлетворяющим условием оптимальности является минимум финансовых затрат, связанных со строительством, содержанием и ремонтом дорожной сети и перемещения по ним транспортных средств. В исследовании этот показатель принят в качестве критерия оптимальности в экономико-математической модели дорожной сети. Следовательно, основное требование, предъявляемое к дорожной сети со стороны автомобильного транспорта, заключается в обеспечении реализации всех обслуживаемых им транспортных связей при наименьших необходимых для этого затратах.

Из рассмотренного примера можно сделать заключение, что основное условие для оптимальных связывающих сетей автомобильных дорог следующее: каждая корреспондирующая точка в оптимальной связывающей сети дорог связана со всеми остальными корреспондирующими точками по направлениям, обеспечивающим наименьшие финансовые затраты, необходимые для перемещения пассажиров и грузов из этой точки в остальные корреспондирующие точки.

Отсюда также вытекает и общий принцип построения оптимальной связующей дорожной сети, которая заключается в том, что всякая изолированная точка в оптимальной связывающей сети дорог соединяется со всеми остальными корреспондирующими точками звеньями, обеспечивающими наименьшие финансовые затраты на перемещение пассажиров и грузов из этой точки во все остальные корреспондирующие точки сети.

На основании общего принципа задача сводится к отбору таких звеньев, при которых сформировались бы маршруты, обеспечивающие дорожно-транспортные затраты между двумя корреспондирующими точками.

### Список библиографических ссылок

1. Sakhapov R. L., Nikolaeva R. V., Gatiyatullin M. H., Makhmutov M. M. Risk management model in road transport systems. Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 738. № 1. P. 1–10.
2. Асанбаев Р. Б., Вдовин Е. А., Мавлиев Л. Ф. Проектирование участка автомобильной дороги с применением переходной кривой переменной скорости движения VGV KURVE : сб. ст. IX международной научно-практической конференции – Наука в современном информационном обществе / НИЦ «Академический», 2016. С. 128–132.
3. Волков Д. О., Гаричев С. Н., Горбачев Р. А., Мороз Н. Н. Математическое моделирование нагрузки транспортной сети с целью оценки жизнеспособности построения новых типов сетевых систем // Производство по МФТИ. 2015. вып. 7. № 3. С. 69–77.

4. Гатиятуллин М. Х., Исмагилов А. И. Влияние инновационной деятельности на безопасность дорожного движения // Техника и технология транспорта. 2017. № 1 (1). С. 32–36. URL: [http://transport-kgasu.ru/files/N1-5.-Gatiyatullin\\_Ismagilov.pdf](http://transport-kgasu.ru/files/N1-5.-Gatiyatullin_Ismagilov.pdf) (дата обращения: 18.10.2017).
5. Nagurney A., Hensher D. A., Button K. J., Haynes K. E., and Stopher P. R. Spatial Equilibration in Transport Networks, in Handbook of Transport Geography and Spatial Systems, , editors, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 2004. P. 583–608.
6. Florian M., Mahut M., Tremblay N. Application of a simulation-based dynamic traffic assignment model. New York : Simulation Approaches in Transportation Analysis: Recent Advances and Challenges. Springer. 2005. P. 1–22.
7. Mahmassani H. S. Dynamic network traffic assignment and simulation methodology for advanced system management applications // Networks and Spatial Economics. 2001. № 1 (3/4). P. 267–292.
8. Barcelo J. and Casas J. Dynamic Network Simulation with AIMSUN // International Symposium Proceedings on Transport Simulation, Yokohama. Kluwer Academic Publishers. 2002.
9. Wardrop J. G. Some theoretical aspects of road traffic research // Proc. Institution of Civil Engineers. 1952. Vol. 2. P. 325–378.
10. Крилатов А. Ю. Оптимальные стратегии управления транспортными потоками в транспортной сети параллельных соединений // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2014. вып. 10. № 2. С. 120–129.
11. Handy S. Planning for accessibility: In theory and in practice // Access to destinations. 2005. P. 131–147.
12. Litman T. Measuring transportation: traffic, mobility and accessibility // ITE Journal. № 73 (10). 2003. P. 28–32.

**Nikolaev R.V.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [nikolaeva1@bk.ru](mailto:nikolaeva1@bk.ru)

**Loginova O.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [loginova@kgasu.ru](mailto:loginova@kgasu.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

## Optimization of the road network

### Abstract

*Problem statement.* The purpose of the study is to determine the criteria of optimality and objective function that reflects the requirements of the road network and which contribute to improving the efficiency of transport.

*Results.* The main results of the study are that determined a general principle and a condition for constructing an optimal connecting road network. Most fully satisfy the condition of optimality is the minimum traffic cost. The principle of optimality lies in the fact that every isolated point in optimal binding of the road network connected to all the other corresponding points of the links that provides the lowest financial costs of moving passengers and freight from this point to all the other offset point in the network.

*Conclusions.* The significance of the results for the construction industry is to minimize the financial costs associated with the construction, maintenance and repair of the road network and moving vehicles on them.

**Keywords:** road network, road transport, offsetting the points, mathematical model, routing, optimization.

## References

1. Sakhapov R. L., Nikolaeva R. V., Gatiyatullin M. H. and Makhmutov M. M. Risk management model in road transport systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 738. № 1. P. 1–10.
2. Asanbaev R. B., Vdovin E. A., Mavliev L. F. Design of the road section with the use of the transition variable speed VGV KURVE : dig. of art. of the IX international scientific-practical conference – Science in the modern information societies / MD-I. TS. «Academic», 2016. P. 128–132.
3. Volkov D. O., Garichev S. N., Gorbachev R. A., Moroz N. N. Mathematic simulation of transport network load with a view to assessing viability of building new types of network systems // *Proizvodstvo po MFTI*. 2015. Vol. 7. № 3. P. 69–77.
4. Gatiyatullin M. H., Ismagilov A. I. The impact of innovative activities on road safety // *Equipment and technology of transport*. 2017. № 1 (1). P. 32–36. URL: [http://transport-kgasu.ru/files/N1-5.-Gatiyatullin\\_Ismagilov.pdf](http://transport-kgasu.ru/files/N1-5.-Gatiyatullin_Ismagilov.pdf) (reference date: 18.10.2017).
5. Nagurney A. Spatial Equilibration in Transport Networks, in *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems*, D. A. Hensher, K. J. Button, K. E. Haynes, Stopher P. R. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 2004. P. 583–608.
6. Florian M., Mahut M., Tremblay N. Application of a simulation-based dynamic traffic assignment model. *New York : Simulation Approaches in Transportation Analysis: Recent Advances and Challenges*. Springer. 2005. P. 1–22.
7. Mahmassani H. S. Dynamic network traffic assignment and simulation methodology for advanced system management applications // *Networks and Spatial Economics*. 2001. № 1 (3/4). P. 267–292.
8. Barcelo J. and Casas J. Dynamic Network Simulation with AIMSUN // *International Symposium Proceedings on Transport Simulation, Yokohama*. Kluwer Academic Publishers. 2002.
9. Wardrop J. G. Some theoretical aspects of road traffic research // *Proc. Institution of Civil Engineers*. 1952. Vol. 2. P. 325–378.
10. Krilatov A. Yu. Optimal strategies for traffic flow management on the transportation network of parallel links // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*. 2014. Vol. 10. № 2. P. 120–129.
11. Handy S. Planning for accessibility: In theory and in practice // *Access to destinations*. 2005. P. 131–147.
12. Litman T. Measuring transportation: traffic, mobility and accessibility // *ITE Journal*. № 73 (10). 2003. P. 28–32.