

УДК 519.6

Моделирование пропускной способности дорожной сети города Березники для ее оптимизации малыми изменениями

И. А. Овсянников, В. Л. Чечулин

Пермский государственный национальный исследовательский университет

Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

ovsj@ovsj.ru, chechulinvl@mail.ru; 8(342) 2-396-424

Описана программная реализация приближенного моделирования пропускной способности дорожной сети города на примере города Березники Пермского края. В модели учтены основные транспортные потоки, применен алгоритм поиска максимального потока. Посредством модели рассмотрены малые возможные изменения дорожной сети с целью повышения пропускной способности всей дорожной сети города в целом; эффективность предложенных изменений оценена количественно.

Ключевые слова: дорожная сеть города; граф дорожной сети; пропускная способность; задача о максимальном потоке; эффективность модификаций дорожной сети города.

DOI: 10.17072/1993-0550-2017-3-55-60

Предисловие

В связи с прекращением развития дорожной сети города Березники в 1990-е гг. с увеличением количества автомобилей плотность транспортных потоков в недавнее время возросла (см. рис. 1). Это заставляет изыскивать возможности оптимизации дорожной сети с минимальными затратами для оптимизации транспортных потоков (минимизации и предотвращения транспортных "пробок"). Для решения этой задачи была построена модель дорожной сети города и разработан программный продукт, реализующий эту модель.

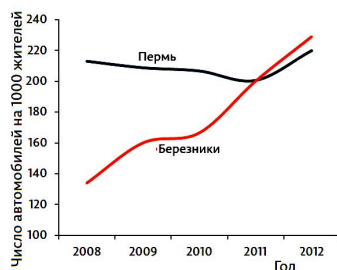


Рис. 1. Число автомобилей на 1000 жителей в городах Березники, Пермь, Пермьстат [2]

Приближенная графовая модель дорожной сети города Березники в программном

продукте была реализована посредством стандартного представления дорожных путей и перекрестков. С его помощью были рассмотрены минимально возможные (наименее затратные) способы оптимизации дорожной сети и оценена их эффективность.

1. Анализ дорожной сети г. Березники

Основные транспортные потоки во внутридорожной сети формируются за счет движения транспортных средств от промышленных предприятий, расположенных на территории города к главному выезду из города. В число промышленных предприятий входят: ОАО Корпорация "ВСМПО-АВИСМА" – Березниковский титаномагниевого комбинат, Филиал "Азот" ОАО ОХК "УРАЛ-ХИМ", ООО "Сода-хлорат", ОАО "БСЗ" – Березниковский содовый завод, Березниковская ТЭЦ-2 – филиал ОАО "ТГК-9".

Для приблизительной оценки величин транспортных потоков можно воспользоваться данными о количестве сотрудников этих организаций (см. табл. 1). Также стоит учесть транспортный поток, идущий из города Усолье с противоположного берега реки Камы. Его часть следует через магистральные дороги Березников.

Таблица 1
 Приближенное число сотрудников
 крупных предприятий (по открытой в
 Интернете отчетности предприятий)

Предприятие	Численность, чел.
Ависма	7000
Азот	6000
Сода-хлорат	1500
БСЗ	1500
ТЭЦ-2	1000

Направления потоков изображены на рис. 2, где квадратом обозначена внутригородская транспортная сеть. Такая ситуация особенно характерна для весенне-осеннего "дачного" сезона, когда сотрудники предприятий после окончания рабочей смены на личном транспорте направляются на дачные участки, расположенные южнее главного въезда в город. При этом автомобили передвигаются по всей внутренней сети города, закладывая в свои маршруты дополнительные узлы, которые необходимо посетить.

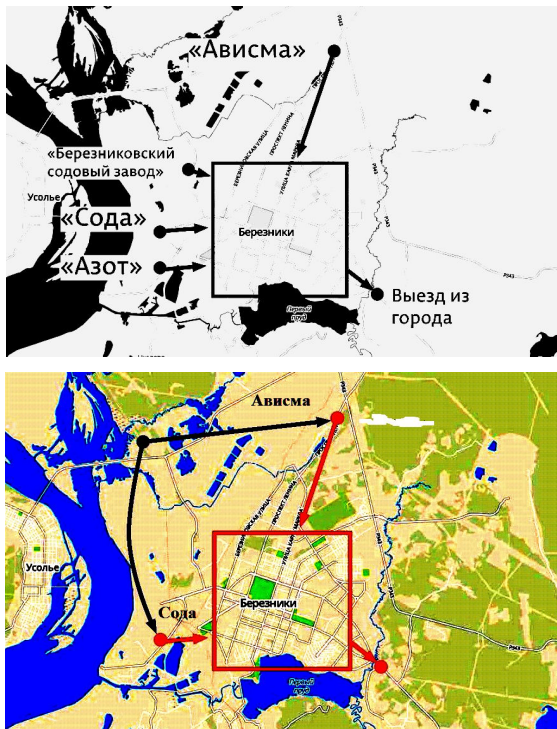


Рис. 2. Сведение входных потоков к двум основным

Исходя из данных, полученных в ходе опроса жителей Березников и взятых из сервиса Яндекс.Пробки [<http://maps.yandex.ru>], было определено время наибольшей загруженности дорожной сети города. В это время образуются дорожные заторы: утренние часы с 8:15 до 8:45 и вечернее – с 16:45 до 17:45. Проблемы возникают на магистраль-

ных улицах, проходящих через центральную часть города: Советский проспект, ул. Юбилейная, ул. Пятилетки. Транспортные средства скапливаются на перекрестках: ул. Юбилейная и ул. Свердлова, ул. Юбилейная и ул. Мира, ул. Пятилетки и ул. Свердлова, ул. Пятилетки и ул. Мира.

2. Пропускная способность дорожной сети

Отметим, что пропускная способность всей транспортной сети, в отличие от отдельных ее элементов, не имеет до сих пор единого критерия оценки. Специалисты придерживаются различных критериев оценки этого показателя. В [1] отмечено, что пропускная способность транспортной сети может быть оценена по ее плотности, емкости, суммарной пропускной способности входных дорог относительно площади обслуживаемого района, условию возникновения затора на любом отрезке сети и т.д. Наиболее объективную оценку пропускной способности транспортной сети можно получить на основе теории графов.

Количество автомобилей, которое может пройти по участку дороги за определенный отрезок времени называют *пропускной способностью этого участка*. Она зависит от количества полос дороги, скорости движения транспортных средств, роли участка в составе дороги, степени организованности движения. Пропускная способность каждого участка может меняться в широких пределах в зависимости от погодных условий или состава движения.

Пусть имеется значение максимального потока $|f|$ за n поисков увеличивающего пути. Маршрутом m_i в графе называется чередующаяся последовательность вершин и ребер $v_0, e_1, v_1, e_2, \dots, e_k, v_k$, в которой любые два соседних элемента инцидентны, где k – число ребер. По каждому из n маршрутов существует поток $f_i > 0$ такой, что

$$\sum_{i=1}^n f_i = |f|. \quad (1)$$

Каждый из n маршрутов кроме величины потока, существующего на нем, обладает длиной d_i , в метрах:

$$d_i = \sum_{j=1}^k d_{e_j}; e_j \in m_i, \quad (2)$$

временем прохождения одного транспортного средства по этому маршруту t_i , мин:

$$t_i = \sum_{j=1}^k t_{e_j}; e_j \in m_i. \quad (3)$$

Для существующей дорожной сети на основании приведенных выше формул рассчитывается средняя длина маршрута \bar{d} :

$$\bar{d} = \frac{1}{|f|} \sum_{i=1}^n d_i f_i \quad (4)$$

и среднее время прохождения маршрута одним транспортным средством \bar{t} :

$$\bar{t} = \frac{1}{|f|} \sum_{i=1}^n t_i f_i. \quad (5)$$

С помощью выражений (4) и (5) оценивается эффективность модификации транспортной сети. Для модифицированной дорожной сети G_{mod} обозначим среднюю длину маршрута \bar{d}_{mod} , среднее время прохождения маршрута одним транспортным средством \bar{t}_{mod} . Тогда эффективность модификации дорожной сети по средней длине маршрута q_d равна, %:

$$q_d = \frac{\bar{d} - \bar{d}_{mod}}{\bar{d}} 100, \quad (6)$$

эффективность модификации дорожной сети по среднему времени прохождения маршрута q_t равна, %:

$$q_t = \frac{\bar{t} - \bar{t}_{mod}}{\bar{t}} 100. \quad (7)$$

Также оценивается экономия от модификации в финансовом выражении для всех пользователей дорожной сети, тыс. руб.:

$$q_e = |f| \bar{d}_{mod} \tau_f q_d k 1,8 p \mu \quad (8)$$

где k – расход топлива, л./км; p – цена 1 л. бензина, руб.; μ – число дней в году, когда возникает максимальный поток в сети длительности τ_f , ч. Коэффициент перед p обозначает соответствие расходов на бензин эксплуатационным расходам автомобиля.

3. Задача о максимальном потоке

Задача о максимальном потоке ставится для нахождения максимальной скорости пересылки продукта от источника к стоку, при которой не будут нарушаться ограничения пропускной способности.

В задаче о максимальном потоке может быть несколько источников и стоков. Эту задачу можно свести к обычной задаче. Для этого добавляется фиктивный источник s и ориентированные ребра (s, s_i) с пропускной способностью $c(s, s_i) = \infty$ для каждого $i = 1, 2, \dots, m$. Существует несколько способов решения задачи, например, алгоритм "поднять в начало", метод Форда–Фалкерсона.

Среди реализаций поиска увеличивающего пути в методе Форда–Фалкерсона, имеющих полиномиальное время работы, существуют такие алгоритмы, как алгоритм Дейкстры, алгоритм поиска в ширину, алгоритм поиска в глубину и др.

4. Программная реализация модели дорожной сети

Исходные данные для программной реализации представляют собой подготовленный файл расширения ".OSM" карты дорожной сети Березников. Файл основывается на открытых картографических данных сервиса OpenStreetMap [3]. Данные создаются пользователями сервиса из различных городов мира и постоянно обновляются. На сервисе доступны для скачивания данные, в том числе по г. Березники. Подготовка загруженного файла состоит из удаления данных, не относящихся к дорожной сети, поиска и обновления недостающих характеристик о количестве полос движения, максимальной разрешенной скорости движения, классе дороги и направлении. Также были удалены незначимые проезды и для каждой дуги дорожного графа обозначен коэффициент пропускной способности. Добавлены отдельные дуги на участках регулируемых и нерегулируемых перекрестков. Всего в итоговый вариант графа дорожной сети г. Березники вошли 573 вершины и 929 дуг.

Файл ".OSM" был преобразован к реляционной базе данных для быстрой выборки объектов дорожной сети из приложения.

Рассмотрим возможности приложения. При нажатии пользователем кнопки "GET DATA" (рис. 3), приложение обращается к базе данных и предоставляет в таблицу "Nodes" список вершин дорожного графа, их параметры, заданные изначально нулями для выполнения алгоритма "поднять-в-начало". В таблицу "Edges" поставляются дуги дорожного графа со всеми характеристиками (связи с вершинами, длины, пропускные способности и др.).

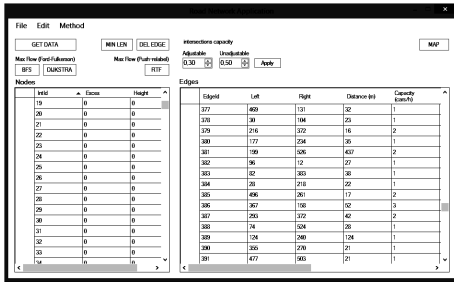


Рис. 3. Интерфейс программы, база данных дорожного графа

Значение пропускной способности одной полосы дороги задано в приложении в виде константы. Для изменения пропускной способности на перекрестках в интерфейсе есть два поля, позволяющие задать коэффициенты снижения пропускной способности для нерегулируемых (Unadjustable) и регулируемых (Adjustable) перекрестков.

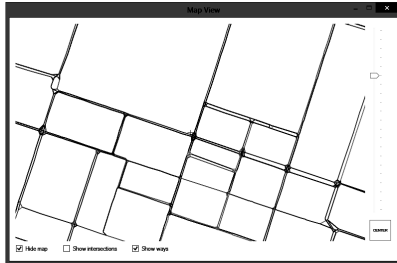


Рис. 4. Интерфейс программы, карта, исходные данные из [3]

При нажатии кнопки "MAP" открывается новое окно с визуализацией всей дорожной сети (рис. 4). Там возможно установить видимость дорог, вершин сети, а также подложки – карты OpenStreetMap, которая подгружается через интернет. Кнопки "DIJKSTRA", "BFS", "RTF" запускают выполнение поиска максимального потока методом Форда–Фалкерсона (алгоритмами Дijkstra, поиска в ширину), алгоритмом "поднять-в-начало" соответственно.

Есть возможность задать долю количества потока, которое будет отправлено в направлении № 1 (от заводов "Азот", "Сода", "Березниковский содовый завод") от величины максимального потока.

После выполнения алгоритма "поднять-в-начало" значение максимального потока пользователь видит во всплывающем окне. Результат работы алгоритмов, основанных на методе Форда–Фалкерсона, отображается в окне с областью отображения карты (рис. 5). Оно содержит информацию о всех маршрутах, в которых существует максимальный поток и сводную таблицу с вычисленными характеристиками каждого маршрута.

На рис. 2 были обозначены основные транспортные потоки г. Березники в вечернее время. На дорожной сети направления от заводов "Азот", "Сода", "Березниковский содовый завод" из-за близкого месторасположения и скорого сливания в один поток были объединены фиктивными дугами с бесконечной пропускной способностью в направлении с условным названием "Сода". Поток с завода "Ависма" условно назван "Ависма". Так как для решения задачи о максимальном потоке необходима всего одна вершина-источник, то только что обозначенные направления можно объединить фиктивными дугами и фиктивной вершиной.

Таким образом, построена специальная модель дорожной сети г. Березники, она основана на знании основных направлений транспортных потоков города в определенные промежутки времени.

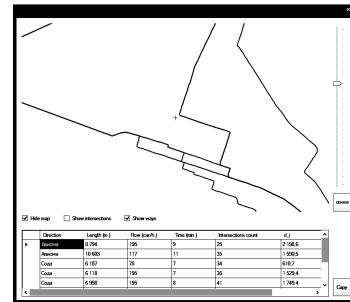


Рис. 5. Результат работы алгоритма

5. Минимальные модификации дорожной сети

В качестве минимальных изменений дорожной сети г. Березники было предложено три варианта:

1) Изменение 1 (Mod1). Добавление 4-полосной дороги по ул. Советский проспект между ул. Карла Маркса и ул. Черепанова. Длина – 221 м (см. рис. 6).

2) Изменение 2 (Mod2). Добавление 2-полосной дороги от ул. Большевикская до перекрестка ул. 30 лет Победы и ул. Набережная. Длина – 260 м (см. рис. 7).

3) Изменение 3 (Mod3). Расширение участка дороги по ул. Советский проспект до 4 полос от ул. Ломоносова до ул. Свердлова, добавление 4-полосной дороги от этого участка по диагонали к перекрестку ул. Пятилетки и ул. Свердлова, организация кольцевого движения на этом перекрестке. Длина диагонального участка – 312 м (см. рис. 8).

Модификация 3 приближенно эквивалентна более минимальной (Mod3a): 4-полос-

ная дорога по ул. Советский проспект от ул. Ломоносова до ул. Свердлова (длина ок. 240 м.).

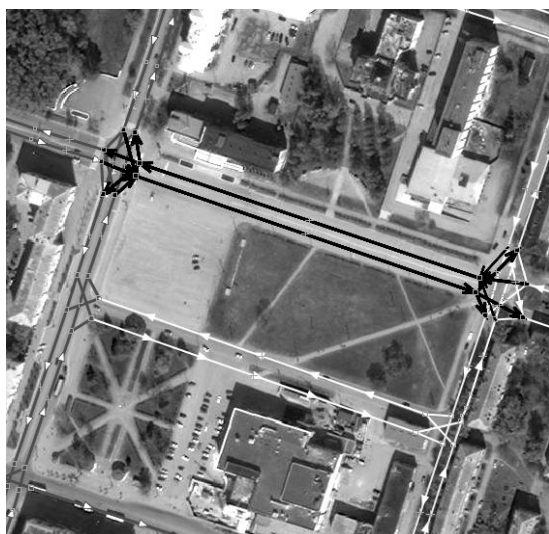


Рис. 6. Изменение 1, исходная карта по [3]

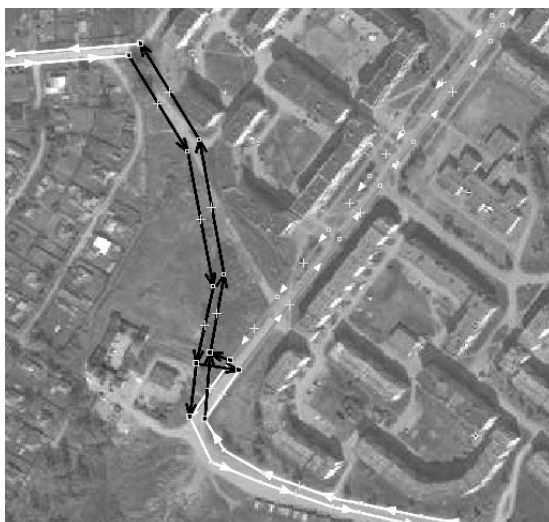


Рис. 7. Изменение 2, исходная карта по [3]

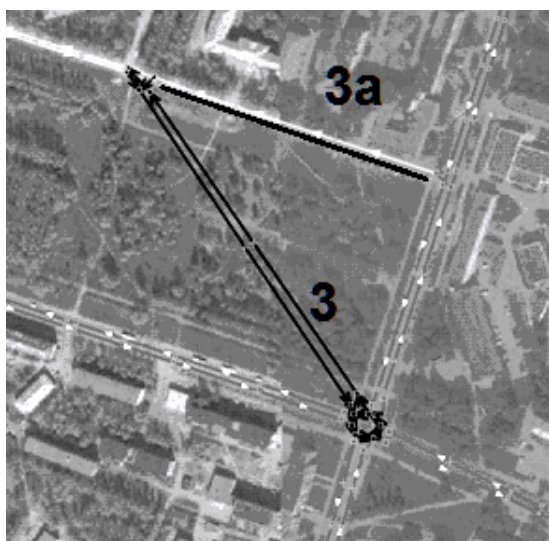


Рис. 8. Изменение 3, исходная карта по [3]

6. Результаты моделирования

В результате применения разработанного приложения для моделирования дорожной сети г. Березники были получены следующие результаты. Величина максимального потока $|f| = 780$ авт/ч. Такое значение было получено после выполнения алгоритма "поднять-в-начало", метода Форда–Фалкерсона (с поиском увеличивающего пути алгоритмом Дейкстры, алгоритмом поиска в ширину). После применения к модели малых изменений дорожной сети Mod1, Mod2, Mod3 и их комбинаций величина максимального потока осталась неизменной.

Наибольший положительный эффект от применения малых изменений дорожной сети наблюдается при следующем отношении потоков: направление "Ависма" – 40 % от величины максимального потока, направление "Сода" – 60 %. Данное соотношение близко к реальным показателям, если учитывать приведенные ранее данные о количестве сотрудников крупных предприятий города.

Таблица 2

Эффективность малых изменений

№ изменения (модификации)	Уменьшение среднего времени прохождения маршрута	Уменьшение средней длины маршрута
1	0,42%	0,18%
2	2,71%	2,55%
1+2	4,31%	3,90%
1+3	0,75%	0,67%
1+2+3	4,47%	4,54%

Далее приведена сравнительная таблица эффективности малых изменений дорожной сети (табл. 2). Эффективность вычислена по формулам (6) и (7). В финансовом выражении при осуществлении изменений Mod 1 и Mod 2 суммарная экономия для всех пользователей дорожной сети по формуле (8) приблизительно равна 600 тыс. руб./год.

Заключение

Таким образом, на основе методов математического моделирования дорожных сетей и вычисления их характеристик была составлена графовая модель дорожной сети города Березники, ее цифровое представление, реализовано приложение, позволяющее вычислять характеристики сети. Полученные показатели позволили определить эффективность некоторых малых изменений участков существующей дорожной сети. Разработанное

приложение позволяет сделать предварительную экспертную оценку дорожной сети специального вида, подробнее см. [4].

В будущем данную работу можно дополнить новыми критериями определения оптимальных путей в дорожной сети, рассмотреть другие возможные изменения участков сети, а также применить использованные методы моделирования для дорожных сетей других городов.

Список литературы

1. Горев А.Э. Основы теории транспортных систем: учеб. пособие. 2010.
2. Пермьстат. Территориальный Орган Федеральной Службы Государственной Статистики по Пермскому Краю. URL: <http://permstat.gks.ru/> (дата обращения: 02.01.2017).
3. *OpenStreetMap* – веб-картографический проект. URL: <http://www.openstreetmap.org> (дата обращения: 02.01.2017).
4. Овсянников И. А. Моделирование и оптимизация дорожной сети большого города: выпускная квалификационная работа бакалавра / научн. рук. В.Л. Чечулин). Пермь: ПГНИУ, 2014. 71 с.

Simulation of the capacity of the road network of the town of Berezniki for its optimization by small changes

I. A. Ovsyannikov, V. L. Chechulin

Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia
ovsj@ovsj.ru, chechulinvl@mail.ru, ph. 8 (342)-2-396-424

The paper describes a program implementation of approximate simulation of a town road network capacity by the example of the town of Berezniki of Perm Krai (Russia). In the model, the main traffic flows are taken into account, the maximum flow search algorithm is applied. Based on the model, we consider small possible changes in the road network aimed at increasing its capacity; the efficiency of the proposed changes is quantified.

Keywords: *road network of the town; graphs of the road network; traffic capacity; maximum flow problem; efficiency of modifications of the road network of the town.*