

Современные проблемы использования интеллектуальной базы математического моделирования при борьбе с заторами в крупных городах России



В. В. Захаров,
 докт. физ.-мат. наук,
 профессор, заведующий
 кафедрой математического
 моделирования
 энергетических систем
 Санкт-Петербургского
 государственного
 университета (СПбГУ)



А. Ю. Крылатов,
 мл. науч. сотр.
 Института проблем
 транспорта им. Соломенко
 РАН, аспирант СПбГУ

Основной преградой на пути внедрения мировой практики использования математических моделей для решения транспортных проблем крупных российских городов является невысокая точность в виду отсутствия необходимой информации о трафике. Исправить ситуацию могут широко внедряемые сегодня в России системы мониторинга дорожного движения, способные обеспечить поступление данных для построения матриц корреспонденций между узлами улично-дорожной сети.

Ключевая причина возникновения заторов в крупных городах – высокая плотность автотранспорта на единицу площади дорог. Характерной особенностью российских мегаполисов на современном этапе является ускоренный рост уровня автомобилизации по сравнению с ростом протяженности и площади улично-дорожных сетей (УДС). Отсюда и ухудшение транспортной ситуации вследствие нехватки ресурсов для обеспечения адекватного развития УДС.

При взгляде на крестообразное пересечение красной и синей линий, изображенных на часто используемом в публикациях рисунке (рис. 1), невольно возникает ассоциация с кривыми уров-

ней рождаемости и смертности населения России. Только если кривая рождаемости в последнее время неуклонно поднимется вверх, демонстрируя положительную динамику выхода страны из опасной демографической ситуации, то о кривой роста продолжительности магистральной сети то же самое сказать нельзя. Обстановка, аналогичная обстановке в Москве, характерна и для других крупных городов с динамично возрастающим уровнем автомобилизации.

История вопроса

Первыми городами мира, столкнувшимися с проблемой заторов и пробок на дорогах, были Нью-Йорк и Токио. Естественно, что сегодня именно эти города имеют наибольший опыт решения дорожно-транспортных проблем. Среди других мегаполисов, решающих подобные проблемы на достаточно высоком уровне, следует, прежде всего, выделить Сеул, Лондон, Сингапур, Мельбурн и Лос-Анджелес. Во всех этих городах наряду с методами, учитывающими специфику мегаполисов, применяются общие подходы к расчистке улиц от пробок. При анализе накопленного опыта следует помнить, что большинство имеющихся методов борьбы с заторами опираются на некую интеллек-



Рис. 1. Протяженность магистральной улично-дорожной сети и рост парка автомобилей в Москве



ФОТО: СЕРГЕЙ ПОРИН

туальную базу, которая формировалась на протяжении почти ста лет существования данной проблемы. Речь идет о методах математического моделирования транспортных потоков [1, 2].

Теория транспортных потоков развивалась исследователями различных областей знаний: физиками, математиками, специалистами по исследованию операций, транспортниками, экономистами [2]. Основы математического моделирования дорожного движения были заложены еще в 1912 г. русским ученым профессором Г. Д. Дубелиром. В 1955 г. Лайтхилл и Уизем предложили первые математические модели транспортных потоков, построенные на базе теории механики сплошной среды [3]. В конце 1950-х годов Ф. Хейт впервые выделил математические исследования транспортных потоков в самостоятельный раздел прикладной математики. Данная работа послужила толчком к новой волне исследований в этой области, которые активно проходили в 1960–1970-х годах. В нашей стране значительный всплеск активности в изучении движения автотранспорта наблюдался в конце 1970-х годов. В связи с подготовкой к Олимпийским играм 1980 г. в Москве. В США в конце 1980-х – начале 1990-х годов проблемы исследования транспортных систем были возведены в ранг проблем национальной безопасности. Сегодня имеется обширная литература по моделированию автотранспортных потоков. Среди недавних публикаций российских ученых, посвященных моделированию транспортных систем крупных городов, можно, например, отметить статью [3]. Целый ряд высокорейтинговых академических журналов посвящен исследо-

ванию динамических моделей автомобильного движения. Наиболее крупными из них являются Transportation Research, Transportation Science, Mathematical Computer Simulation, European Journal of Operational Research.

Таким образом, в настоящий момент уже имеется серьезный, но вместе с тем постоянно развивающийся, интеллектуальный базис, чтобы исследовать современные проблемы управления транспортными потоками в больших городах.

Подходы, модели и методы

Как уже отмечалось, основная причина такой проблемы, как заторы в мегаполисах, заключается в том, что в крупных городах плотность автотранспортных средств на единицу площади всех имеющихся дорог последнее время динамично растет. Данное обстоятельство ведет к неизбежному возникновению больших скоплений машин на узлах дорожно-транспортной сети. Такие узлы чаще всего называют проблемными и стараются избавиться от пробок, работая именно с этими узлами. Подобный подход выглядит вполне рациональным и, приняв по умолчанию известные ограничения, его можно назвать правильным при ликвидации локальных проблем конкретных участков УДС. Однако успешное решение локальной проблемы не всегда приводит к должному эффекту для всей сети: пробка, пропадая в одном месте, появляется в другом.

По информации аналитического центра «Яндекс Пробки», в 2010 г. по УДС Москвы в часы пик одновременно двигались более

1 млн автомобилей. Исходя из данных журнала «Авторамблер», в Москве ежедневно образуется по 800 автопробок, в которых движутся в среднем по 1400 машин. Причиной возникновения такой ситуации является не столько возросший объем транспортного потока, сколько отсутствие точной информации о районах формирования потоков, направлениях их движения и районах УДС, где потоки ослабевают.

Авторы статьи [4] утверждают, что для повышения эффективности транспортного процесса на УДС городов необходимо прибегать к комплексной схеме организации дорожного движения, а не растрчивать силы на рассмотрение локальных вопросов. В зарубежной научной литературе также придерживаются четкого разделения между системными и локальными решениями [1], осознавая важность каждого из них и, самое главное, различие областей их применения.

В настоящей работе, считая решенным вопрос о приоритете реализации комплексных схем организации дорожного движения, мы попытаемся разобраться в том, что же сегодня является преградой на пути использования методов математического моделирования для реализации этих самых комплексных схем организации дорожного движения в крупных городах России.

Методология решения задач, связанных с управлением транспортными потоками и построением оптимальной транспортной инфраструктуры, разработана довольно хорошо. Сегодня существует класс задач, связанных с разработкой комплексных схем организации дорожного движения, который носит название UTNDP – задачи построения городской транспортной сети [2]. UTNDP – это задачи, которые имеют дело со всей иерархией принятия решений в области транспортного планирования и включают стратегические, тактические и операционные решения. Стратегические – долгосрочные решения, связанные с инфраструктурой транспортных сетей, включая транзитные и внутренние сети. Тактические решения связаны с эффективным использованием ресурсов существующих городских транспортных сетей. Операционные – краткосрочные решения, связанные с управлением транспортными потоками, нахождением матриц корреспонденций (информация об основных пунктах отправления и прибы-

тия транспорта) или составлением расписаний.

Ограничить рост автомобилизации наших городов трудно, поэтому основным направлением усилий по устранению заторов становится проектирование и строительство новых дорог, изменение структуры УДС, позволяющие удовлетворить растущий спрос на движение транспорта по улицам города. Чем точнее будет прогноз этого спроса на достаточно длительную перспективу, тем эффективнее будут инвестиции в данное направление. Как отмечается в статье [5], для прогноза динамики потоков применяется несколько методик, наиболее известная из которых основана на расчете межрайонных корреспонденций и распределении потоков по транспортной сети с использованием методов поиска равновесного состояния.

Распределение транспортных потоков

Одной из основных концепций в области управления транспортными системами крупных городов является концепция равновесного распределения транспортных потоков по маршрутам из заданного района отправления в район прибытия, принципы которого были впервые сформулированы Вардропом [6]. Вардроп предположил, что по прошествии определенного времени любая транспортная система приходит к некоторому равновесному состоянию, в котором, согласно первому принципу, время передвижения по всем используемым маршрутам одинаково для всех участников движения, и меньше времени, которое потратит любой участник движения, изменив свой маршрут. Согласно второму принципу, среднее время передвижения является минимальным.

При математической постановке оба принципа сводятся к задачам минимизации некоторых целевых функционалов [7]. Согласно первому принципу,

$$\min z(f) = \sum_i \int_0^{f_i} t_i(x) dx, \quad (1)$$

а согласно второму принципу,

$$\min z(f) = \sum_i f_i t_i(f_i), \quad (2)$$

где i – номер маршрута; f_i – транспортный поток, движущийся по i -му маршруту; $t_i(f)$ – время движения одного транспортного средства по i -му маршруту, зависящее от величины потока на данном маршруте.

Следует отметить, что первый из приведенных функционалов не имеет явного физического смысла, являясь исключительно математической конструкцией. В [7] показано, что минимизация этого функционала в задаче (1) приводит транспортные потоки к состоянию, в котором время передвижения по всем используемым маршрутам одинаково для всех участников движения и меньше времени, которое потратит любой участник движения, изменив свой маршрут.

В свою очередь, функционал в задаче (2) имеет более ясный физический смысл. Поскольку произведение f_i на $t_i(f_i)$ можно интерпретировать как суммарное время прохождения автомобилей из транспортного потока объемом f_i по i -му маршруту, сумма таких произведений по всем возможным маршрутам i дает оценку времени прохождения всех транспортных потоков между районом отправления и районом прибытия. Таким образом, находя оптимальное распределение транспортных потоков по всем возможным маршрутам, мы достигаем минимального значения общего времени движения автомобилей, входящих в транспортный поток из района отправления в район прибытия.

Концепция равновесия по Вардропу активно используется в практике при прогнозировании распределения потоков на транспортной сети с использованием программных продуктов, таких как PTV Vision, TransCad и др. Естественно, что при применении данного подхода одним из ключевых является вопрос явного вида функции $t_i(f_i)$. Среди функций, которые наиболее часто использует Бюро общественных дорог США, можно выделить BPR-функцию [8]:

$$t_i(f_i) = t_i^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{f_i}{c_i} \right)^\beta \right],$$

где α, β – параметры, определяемые для каждого маршрута экспериментальным путем;

t_i^0 – время свободного движения по i -му маршруту;

c_i – пропускная способность i -го маршрута.

Транспортные службы крупных городов мира разрабатывают специальные таблицы значений этих параметров, зависящие от времени суток, погодных условий, количества полос для движения и т. п. [8].

Физический смысл BPR-функции заключается в том, что с увеличением транспортного потока на маршруте увеличение времени движения происходит пропорционально отношению объема транспортного потока к пропускной способности маршрута.

Концепция равновесия по Вардропу достаточно глубоко исследована в теоретическом плане. Тем не менее, под воздействием новых условий появляются ее новые расширения и уточнения [9]. Например, в связи с массовым развитием средств телекоммуникации и внедрением в практику навигационных систем меняется поведение водителей на дороге. Они часто предпочитают при выборе маршрута ориентироваться на советы имеющих у них навигационных устройств. Таким образом, на УДС формируются группы пользователей (водителей), использующих одинаковые стратегии выбора маршрута. Поскольку каждый провайдер услуг навигации заинтересован в выборе наилучших маршрутов для членов своей группы, его интересы вступают в противоречие с интересами других провайдеров, преследующих такие же цели. Равновесие, которое может быть образовано в такой ситуации, можно интерпретировать как равновесие по Нэшу, известное из теории игр и отличающееся в общем случае от равновесия Вардропы. Поэтому для рассмотрения вопроса равновесного распределения потоков стали появляться исследования с учетом игровой концепции равновесия транспортных потоков [10].

Равновесное распределение транспортных потоков зависит от топологии транспортной сети, так как является реакцией на ее параметры (перечень возможных маршрутов, значения пропускной способности улиц и т. п.). В связи с этим важной задачей в области улучшения транспортной ситуации в крупных городах является поиск оптимальной топологии самой транспортной сети [1]. Такая задача чаще всего формулируется в виде двухуровневой модели оптимизации [10]. Идея подобной модели заключается в том, что администрация города (верхний уровень), формируя программу инфраструктурных преобразований, учитывает будущее стремление пользователей транспортной системы (нижний уровень) к равновесному – по Вардропу – перераспределению транспортных потоков в условиях новой инфраструктуры. Такой подход позволяет создать топологию УДС города, которая в будущем минимизирует среднее время передвижения транспортных потоков. В российской научной литературе математическая формализация такой двухуровневой модели впервые была представлена в [11].



Приведем иллюстрацию оптимальных изменений топологии УДС Василеостровского района города Санкт-Петербурга и перераспределения соответствующих транспортных потоков, полученных на базе двухуровневой модели оптимизации (рис. 2), разработанной в Центре интеллектуальной логистики Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) совместно со специалистами Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН. Зеленым и оранжевым цветом выделены магистрали одностороннего движения, по которым перераспределяются основные транспортные потоки после обеспечения одинаковой ширины проезжей части по всему их протяжению.

Конечно, данный результат носит исключительно демонстрационный характер, так как в качестве исходных данных была использована матрица корреспонденций для трех районов отправления-прибытия (Адмиралтейский район, Петроградский район и район улицы Кораблестроителей), а величины транспортных потоков были получены экспертным путем с учетом информации системы «Яндекс». Тем не менее, данные расчетов говорят, что подобного рода изменения не требуют существен-

ных финансовых вложений, но могут увеличить общую пропускную способность УДС Василеостровского района в 1,5–2 раза, что свидетельствует об эффективности самого метода.

Межрайонные корреспонденции в мегаполисе

Основная проблема применения на практике математических моделей транспортных потоков и решения задач управления заключается прежде всего в неточности или неполноте информации о существующем на транспортной сети спросе на перемещение. Все существующие модели содержат величину потока из района отправления в район прибытия в качестве заданного параметра, а



Рис. 2. Перераспределение потоков по новой топологии транспортной сети Васильевского острова

найденные решения, как правило, чувствительны к его изменениям. Поэтому в вопросах оптимизации и управления изменение величины потока приводит к необходимости заново решать и без того достаточно трудоемкую для большой сети математическую задачу. Более того, получаемые решения могут быть различны при разных значениях потока, что существенно затрудняет их использование на практике. Другими словами, для повышения эффективности математического моделирования необходимо иметь возможность получать наиболее точную и полную информацию о матрицах корреспонденций (количестве автомобилей в единицу времени, движущихся из выявленных районов отправления в районы прибытия).

Расчет матриц корреспонденций сам по себе является задачей, требующей отдельного, подчас очень трудоемкого, алгоритма. Данная проблемная область не оставалась без внимания исследователей на протяжении последних 40 лет [6,12]. Существует обширный набор методов расчета матриц корреспонденций, среди которых одним из наиболее важных, на наш взгляд, является метод сбора информации о номерах проезжающих автомобилей

размещенными на УДС устройствами видеорегистрации [12] или системами сканирования, основанными на применении RFID-технологий. В самом деле, информация о потоках, получаемая с помощью таких устройств, является наиболее информативной и позволяет определить траектории движения автомобилей. Обработка такой информации требует реализации эффективных быстродействующих алгоритмов, позволяющих в условиях мегаполиса обрабатывать массивы данных огромной размерности. Разработка методологии формирования подобных массивов данных и алгоритмов имеет важное фундаментальное и прикладное значение, так как без их помощи нельзя построить матрицы корреспонденций на УДС мегаполиса в достаточно короткие сроки.

На рис. 3 показаны графики временных затрат на реализацию одного из таких алгоритмов расчета матриц корреспонденций, при использовании разных форм представления исходных данных (синий – в виде матриц, красный – в виде массивов): по горизонтали указано количество автомобилей и число устройств регистрации, а по вертикали – временные затраты на реализацию алгоритма в секундах. Как видно из представленных графиков, разработанный алгоритм является работоспособным на больших массивах данных и позволяет рассчитывать корреспонденции при количестве автомобилей на сети, превышающей несколько миллионов, и достаточно большом числе устройств. Здесь же следует отметить, что для расчетов матриц корреспонденций информация о номерах может поступать в закодированном виде, что «обезличит»

автомобили, застраховав тем самым участников движения от нарушения их прав на частную жизнь.

В России уже существует большое число устройств видеорегистрации для сбора информации о движении автотранспорта по улицам городов, различающихся между собой как по стоимости, так и по качеству работы. Пока они служат в основном источником информации исключительно для оценки транспортной ситуации и регистрации нарушений правил дорожного движения. Однако база данных, формируемая на основе получаемой информации, могла бы дать значительно больший эффект при использовании ее для построения матриц корреспонденций автотранспорта и тем самым способствовать решению многих транспортных проблем крупных городов и территорий с интенсивным движением автотранспорта.

Разработка и внедрение описанных методов исследования и преобразования транспортных систем, действующих на основе современных информационных технологий и математического моделирования, может стать важным инструментарием для успешного решения задач оптимизации транспортной инфраструктуры крупных городов, а также для реализации эффективных организационных мер по управлению дорожным движением. Ожидаемыми результатами применения такой методологии при использовании систем видеорегистрации для получения максимально точных оценок матриц межрайонных корреспонденций могут стать реальное увеличение общей пропускной способности транспортных сетей, предсказуемый рост средней скорости

движения транспорта и устранение заставок на улично-дорожных сетях крупных городов России. ■

Литература

1. Xie F., Levinson D. Modeling the growth of transportation networks: a comprehensive review // *Netw Spat Econ.* 2009. N 9. P. 291–307.
2. Farahani R. Z., Miandoabchi E., Szeto W. Y., Rashidi H. A review of urban transportation network design problems // *European J. Operational Res.* 2013. N 229. P. 281–302.
3. Холодов Я. А., Холодов А. С., Гасников А. В., Морозов И. И., Тарасов В. Н. Моделирование транспортных потоков – актуальные проблемы и перспективы их решения // *Труды МФТИ.* 2010. Т. 2, № 4. С. 152–162.
4. Зырянов В. В., Кочегра В. Г., Поздняков М. Н. Современные подходы к разработке комплексных схем организации дорожного движения // *Транспорт РФ.* 2011. № 1(32). С. 54–59.
5. Петрович М. Л. Градостроительный подход к решению транспортных проблем городов // *Транспорт РФ.* 2010. № 6(31). С. 21–25.
6. Wardrop J. G. Some theoretical aspects of road traffic research // *Proc. Institution of Civil Engineers.* 1952. II. P. 325–378.
7. Beckmann M. J., McGuire C. B., Winsten C. B. *Studies in the Economics of Transportation.* New Haven, CT: Yale Univ. Press. 1956.
8. Horowitz A. J. *Delay/Volume Relations for Travel Forecasting Based upon the 1985 Highway Capacity Manual.* U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 1991.
9. Boyce D. Future research on urban transportation network modeling // *Regional sci. and Urban Econ.* 2007. N 37. P. 427–481.
10. Hollander Y., Prashker J. N. The applicability of non-cooperative game theory in transport analysis // *Transportation.* 2006. № 33. P. 481–496.
11. Захаров В. В., Крылатов А. Ю. Системное равновесие транспортных потоков в мегаполисе и стратегии навигаторов: теоретико-игровой подход // *МТИП.* 2012. № 4(4). С. 23–44.
12. Castillo E., Menendez J. M., Jimenez P. Trip matrix and path flow reconstruction and estimation based on plate scanning and link observations // *Transport Res. Part B.* 2008. N 42. P. 455–481.

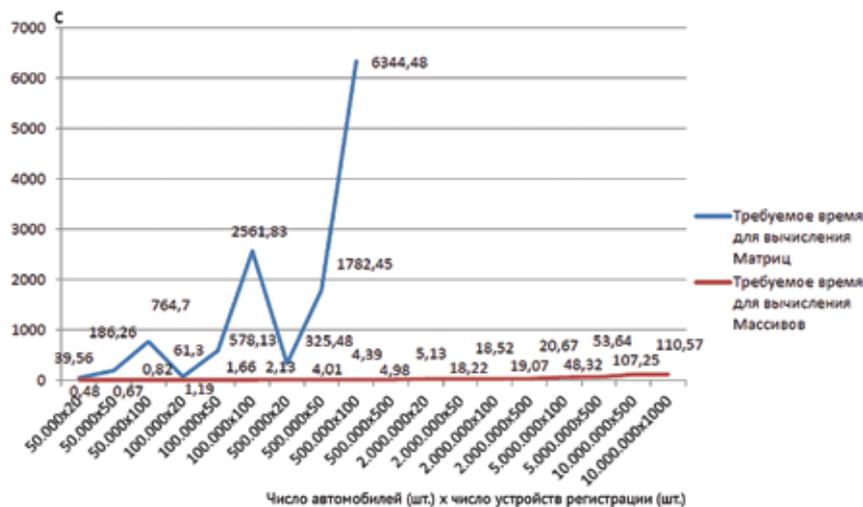


Рис. 3. Временные затраты на вычисления матриц корреспонденций