Разработка методологии создания логико-математической модели движения транспорта на этапе создания концепции умного города

О. А. Славин, А. В. Соловьев, Ан. В. Соловьев

Аннотация. В статье приведена методология разработки логико-математической модели (ЛММ) транспорта при проектировании умного города (УГ). Определены ограничения и допущения модели. Приведен пример разработки ЛММ транспорта для проектируемого умного города Сколково (УГС), показана модель взаимодействия транспортной системы с объектами и системой управления УГС. В приведенном примере показано возможное при проектировании ЛММ транспорта разделение на ЛММ входящих и исходящих (по отношению к УГ) транспортных потоков и ЛММ внутренних транспортных потоков УГ.

Ключевые слова: *логико-математическая модель, информационная системы, безопасность, своевременность выполнения, информационная безопасность, информационные технологии, транспортная система, инфраструктура города, система управления, информационные потоки.*

Необходимость создания методологии построения логико-математической модели (ЛММ) продиктована новизной задачи проектирования УГ, необходимостью предварительного логико-математического описания системы управления УГ, адекватного описания объектов УГ, их поведения, связи с окружающей средой, адекватного описания информационных потоков и управляющих воздействий в системе.

Методология построения ЛММ должна учитывать тот факт, что изменения параметров УГ могут происходить в достаточно широких пределах, так как на этапе проектирования могут быть не достаточно детально проработаны: технические и инфраструктурные конфигурации УГ, а также сетевые, серверные, архитектурные, коммуникационные и прочие конфигурации. Кроме того, в результате интенсивных процессов дальнейших проектирования и разработки проекта УГ, существующие конфигурации могут изменяться. Тем самым цель разработки ЛММ по предложенной методологии можно сформулировать как: получение наглядного первичного представления о процессах, протекающих в системе управления УГ. В результате моделирования должны быть установлены основные принципы организации процессов в системе управления УГС, а также принципы взаимодействия объектов в системе. Представленную методологию можно применять как на этапах разработки концепции УГ, так и на этапах проектирования.

Создание ЛММ системы управления умного города, в частности создание ЛММ транспортных потоков, на этапе разработки концепции для УГ можно охарактеризовать:

- Новизной задачи, которая полностью не решена ни в одном из ныне создаваемых в мире умных городов.
- Нахождением задачи на стыке нескольких дисциплин: строительство, организация транспорта, информатика, теория надежности, разработка систем управления, информационная безопасность.
- Невозможность моделирования УГС на реальных объектах, трудности разработки полноценной имитационной модели.

С одной стороны разработка ЛММ на этапе концептуального проектирования крайне сложна, так как разброс параметров модели может оказаться достаточно большим, а граничные условия не до конца определенными. С другой стороны, последовательно приближаясь к имитационному моделированию, можно достичь приемлемого уровня формализации понятия умного города на этапе концепции, что позволит представить многие решения, которые позже могут быть воплощены в имитационных моделях.

1. Основные понятия и определения

Логико-математическая модель (ЛММ) — описание с помощью логико-математических конструкций объектов реального мира различной природы с учетом взаимосвязей между ними и динамики возникающих во времени процессов с целью дальнейшего проведения разностороннего исследования модели с помощью компьютерных технологий (статистическое, поведенческое, имитационное моделирование с помощью компьютерных программ).

ЛММ целесообразно строить при:

- отсутствии строгого математического или аналитического описания модели;
- необходимости учитывать окружающую динамично меняющуюся среду;
- невозможности (технической, финансовой) проведения экспериментов на объекте реального мира;
- необходимости нелинейного управления временем в процессе моделирования (необходимость искусственно замедлять или ускорять течение времени на произвольных участках временной оси моделирования с целью более детального исследования отдельных явлений и процессов);
- необходимости построения модели объектов различной природы (учитывающих поведение человека, технические процессы, связи между объектами, окружающую динамическую среду, элементы массового обслуживания) одновременно.

Умный город (Smart City) — единая интегрированная информационно-архитектурно-транспортная среда, созданная на основе всеобщего обширного проникновения информационных технологий в архитектуру, коммунальные службы, связь, транспорт и энергообеспечения, создаваемая с целью повышения уровня комфорта, безопасности, доступности услуг с возможностью централизованного управления всей инфраструктурой города.

Умный город позволяет:

- выработать стандарт градостроительства на ближайшие несколько лет;
- решить вопросы доступности услуг (коммунальных, информационных, экстренных, рассчетно-кассовых, транспортных) для своих обитателей;
- повысить безопасность жизнеобеспечения обитателей за счет высокой оперативности реагирования на возникающие ситуации;
- представить комплексное решение транспортных, коммунальных, энергетических проблем.

Далее в статье остановимся на разработке методологии построения ЛММ для транспортной подсистемы УГ, так как, во-первых, объем статьи не позволяет описать подробно ЛММ для УГ в целом, а во-вторых, тема транспорта представляет наибольший интерес с точки зрения ее понимания широким кругом аудитории, в отличие от, например, ЛММ системы управления УГ.

2. Обзор существующих транспортных решений УГ

Идея создания УГ, комфортного для жизни, стала настолько популярна последние годы, что во многих уголках мира наблюдаются активные попытки реализовать самые различные концепции УГ, позволяющего создать комфортную среду обитания в городах. В данном исследовании мы остановимся на обзоре примеров решения транспортных проблем в различных УГ.

Грубо подходы к созданию УГ можно разделить на две группы:

— перестройка существующей городской среды крупных городов в соответствии с принципами УГ;

— постройка небольших (до 50–100 тыс. жителей) городов, изначально основанных на принципах УГ.

И тот и другой подход имеют право на существование. В качестве примеров первого подхода можно привести [9]:

1. Сеул. Более 300 остановок общественного транспорта оборудованы терминалами, которые по беспроводной связи обмениваются информацией с 9300 автобусами. В автобусах установлены модемы беспроводного интернета, а также приемники GPS. Вся информация о перемещении доступна онлайн, т. е. житель Сеула может планировать свои перемещения по городу, не выходя из дома. Ежегодная стоимость развития и поддержки такой интеллектуальной транспортной системы оценивается в 230 млн долл.
2. Сингапур. Введен платный проезд в различные части города в зависимости от времени суток. В результате создается контролируемая среда, существенно сокращаются пробки.
3. Москва. Введение полос общественного транспорта, создание интеллектуальной системы управления транспортными потоками (ИТС). Планируется, что ИТС заработает в 2013 г. В создание ИТС в 2012 г. будет вложено 210 млн долл. Кроме того, 7800 московских автобусов и троллейбусов оснастят датчиками ГЛОНАСС, что

позволит создать единый диспетчерский центр, аккумулирующий всю информацию о движении общественного транспорта.

Однако введение технологий, направленных на решение конкретных проблем (пробки, нарушения ПДД, организация движения общественного транспорта), часто приводит к перераспределению транспортных потоков, которые, особенно в отсутствии сильной связности дорожно-транспортной сети, приводят к возникновению аналогичных проблем в других местах, неподконтрольных информационным системам контроля и управления движением.

Второй подход к применению концепций УГ связан с построением небольших УГ, среда обитания в которых интегрированная и полностью изначально управляемая. Они могут представлять отдельные города и отдельные среды обитания, построенные по принципу УГ, интегрированные в среду больших городов. Характерными примерами здесь могут быть:

1. Масдар (ОАЭ, http://www.masdarcity.ae/en/). Город строится «с нуля». Планируется, что в городе будет полностью запрещен личный транспорт, все движение будет осуществляться при помощи автоматического персонально-общественного транспорта (PRT — Personal Rapid Transit).
2. Парк высоких технологий (Минск, http://www.park.by/?lng=ru). Город представляет собой отдельный район Минска, расположенный рядом с основными транспортными магистралями: центральным проспектом г. Минска, минской кольцевой автомобильной дорогой, дорогой в Национальный международный аэропорт, железнодорожной трассой Берлин—Минск—Москва.

В качестве примеров построенных «с нуля» УГ также могут быть названы: Сонгдо (Южная Корея), Джазан (Саудовская Аравия), Лаваса (Индия), Уси, Хушань, Донгтан (Китай), Долина PlanIT (Португалия). Как пример интеграции УГ в качестве отдельных районов больших городов: центр инноваций в районе 22 Барселоны (Испания).

В качестве достоинства при строительстве УГ «с нуля» можно назвать то, что мы изначально получаем полностью контролируемую интегрированную среду. Недостатком можно назвать ограниченность транспорта УГ системой PRT. При всех удобствах данного средства передвижения и наличия большого количества проектов: Vectrus (Южная Корея), UltraGlobal (Великобритания), 2GetThere (Голландия), а также еще проектов в США и Канаде, единственный проект, находящийся в промышленной эксплуатации — 3,8-километровый участок PRT аэропорта Хитроу (Лондон) фирмы UltraGlobal PRT. Такое положение дел может говорить о недоработках проекта, его дороговизне или невостребованности, что в свою очередь при ориентации только на них может существенно затормозить проект УГ.

При перемещении к УГ из внешней среды и обратно пользователь транспортной системы сталкивается все с теми же проблемами, что в свою очередь может сделать непривлекательной идею работы в УГ, даже при наличии комфортной среды обитания внутри УГ.

Чтобы учесть все проблемы при создании УГ, необходимо начиная с этапа концептуального проектирования УГ моделировать функционирование всех его узлов и элементов, а также их взаимодействий с внешней (по отношению к УГ) средой.

По мнению авторов статьи, приведенная в ней работа позволит облегчить создание УГ. На примере моделирования транспортной составляющей показано, как можно на этапе концепции УГ выявить достоинства, недостатки и ограничения для функционирования транспорта и подобрать оптимальную ЛММ для описания транспортной подсистемы, как части общей среды УГ.

3. Методология построения ЛММ

Кратко представим разработанную методологию построения ЛММ и приведем примеры моделей, созданных по данной методологии при разработке концепции УГС.

1. Перед началом разработки логико-математической модели (ЛММ) необходимо определить цели и задачу разработки, а также методологию создания ЛММ для УГ, определить требования к результатам моделирования.
2. Определение основных ограничений и допущений модели, исходя из положений определяющих концепцию создания УГ в целом.
3. Построение общей схемы ЛММ для УГ. Разработка положений, позволяющих произвести декомпозицию общей ЛММ на отдельные независимые ЛММ, например, основываясь на различных принципах организации движения вне УГ и внутри УГ.
4. Построение основных ЛММ и определение типовых сценариев перемещения транспорта. Определение центров притяжения, основных потоковых магистралей.
5. Разработка сценариев взаимодействия с системой управления УГ и привязка правил перемещения к существующим или проектируемым инфраструктурным решениям.

6. Определение ограничений и допущений для каждой ЛММ и сценариев перемещения.

Ниже приведем пример разработки ЛММ транспорта для умного города Сколково (УГС), разработанной на этапе создания концепции УГС.

4. Определение целей и задач при разработке ЛММ «Транспорт»

На этапе создания концепции УГС определено, что система управления должна состоять из следующих подсистем:

1) объединенный центр оперативного управления (ЦОУ);
2) подсистема «ЖКХ»;
3) подсистема «Транспорт»;
4) подсистема «Здравоохранение»;
5) подсистема «Образование»;
6) подсистема «Социальная сфера»;
7) подсистема «Телекоммуникационные системы»;
8) подсистема «Виртуальный сервис-провайдер».

Так как описание каждой подсистемы требуется разработки отдельной ЛММ, а объем статьи не позволяет описать подробно ЛММ для УГС в целом, остановимся на разработке ЛММ для подсистемы «Транспорт», как представляющей наибольший интерес.

Исходя из специфики УГС, требующей контроля и максимальной управляемости объектов, в качестве базовых функций подсистемы «Транспорт» могут быть выбраны следующие блоки задач:

- управление городским маршрутизированным пассажирским транспортом;
- управление не маршрутизированным пассажирским транспортом (такси, транспортом совместного использования, PRT — Personal Rapid Transit [1] (персональные скоростные перевозки));
- управление дорожным движением на городской улично-дорожной сети;
- транспортное информирование;
- обеспечение электронных платежей и контроля доступа;
- управление парком специальных автомобилей (системы обслуживающего транспорта, грузовых перевозок);
- контроль транспортных потоков при движении внутри УГС, а также при въезде и выезде из/в УГС.

В общем случае для задачи управления транспортом применимы методы моделирования транспортных потоков (гравитационные, энтропийные, газо-/гидродинамические, фазовых переходов (например, F-S-J), а также классические типа LWR, Танака, Уизема и др., см. [8]).

В общем случае также задача управления транспортом разбивается на следующие подзадачи:

- управление подвижным составом транспортной системы;
- управление перекрестками;
- контроль дорожной обстановки (в том числе и возникновение дорожно-транспортных происшествий (ДТП)) и выполнения правил дорожного движения (ПДД);
- управлением заторами.

В общем ЛММ предполагается строить на основании графических моделей функционирования с заданием параметров интенсивности потоков информации, вероятностей случайных событий (сбои, нештатные ситуации). Вероятностно-временные модели выполнения операций обработки информации. Для транспортных моделей задача декомпозируется предположительно на две: задача моделирования транспортных потоков до УГС, задача моделирования транспортных потоков внутри УГС. Данные модели относительно независимы, так как предполагается [1, 7] сделать передвижение по городу максимально на общественном транспорте, такси, PRT (Personal Rapid Transit) или пешком (максимальный приоритет согласно концепции УГС — у пешеходов). Следовательно, модель внутри УГС должна быть основана на принципе максимальной управляемости. Модель для доступа к УГС может быть построена, например, на основе «гравитационного» подхода, для которого УГС (пересадочные хабы, перехватывающие парковки) рассматривается как множество локальных центров притяжения/отталкивания для приезжающих в УГС (предположительно 15 000 ежедневно) сотрудников и гостей.

Модель транспорта следует отделить от модели системы управления УГС, так как объекты транспорта и пешеходы могут контролироваться системой, но ни в коем случае не управляться ею полностью. Вследствие этого модели транспорта и пе-

[1] Специальные персонально-общественные транспортные единицы (PRT), движущиеся по выделенным линиям (монорельс, рельсовые или безрельсовые дороги), предназначенные для автоматизированной или автоматической перевозки 2–4 человек. Вызов осуществляется с помощью терминалов на специализированных остановках, задание программы движения (маршрута) внутри транспортной единицы. Оплата может осуществляться как на остановках, так и внутри транспортной единицы (в зависимости от конфигурации), как наличными, так и по безналичному расчету. Транспортные единицы PRT объединены единой системой управления и диспетчеризации.

шеходов, а также модели их возможного поведения необходимо выделить в отдельную ЛММ, как модель объектов (и субъектов) УГС.

Безусловно, система управления УГС должна предоставлять средство моделирования транспортных потоков и прогнозирования развития транспортных ситуаций на дорогах. Необходимо выбрать адекватную математическую модель транспортных потоков, позволяющую оценивать дорожные ситуации и прогнозировать их развитие быстро и с достаточной точностью.

Как было отмечено выше, модель транспортных потоков может контролироваться системой управления УГС, но не полностью управляться. Поэтому необходимо:

1. выделить ЛММ транспорта в отдельную модель объектов УГС;
2. определить основные показатели моделей и построить модели транспортных потоков;
3. определить состав и возможные сценарии поведения участников транспортной составляющей УГС.

5. Определение ограничений и допущений при разработке ЛММ транспорта

На этапе разработки концепции была кратко определена конфигурация УГС, исходя из положений которой [1] можно сформулировать следующие ограничения и допущения.

Предположительно транспортные потоки для УГС складываются из внутреннего потока персонально-общественного транспорта, курсирующего по выделенным линиям (это могут быть монорельс, выделенные рельсы или выделенные полосы движения), из внутреннего потока личного транспорта, внешних (по отношению к УГС) потоков электропоездов, автобусных маршрутов, личного транспорта.

Предположительно, транзитные транспортные потоки через УГС не допускаются.

Граф дорог известен с достаточной достоверностью (см. рис. 1), градостроительный план УГС утвержден как генеральный план, однако проектов большинства зданий еще нет, следовательно, с некоторой вероятностью план может претерпеть изменения. Существует также информация концепции о маршрутах городского транспорта, однако отсутствует информация о PRT, остановках, светофорных системах, скоростных режимах и иных параметрах движения внутри сети дорог УГС.

В связи с недостатком информации математическая модель может быть сформулирована в общем виде, без детализации по конкретному графу транспортной сети, графу маршрутов общественного транспорта и PRT и т. д.

В оценке транспортной сфере есть некоторая определенность. В настоящее время связь УГС с Москвой осуществляется через перегруженное Минское шоссе. В будущем предполагается строительство дублера Минского шоссе, что увеличит транспортную доступность в этом направлении для автомобилей (личного транспорта, обслуживающего транспорта и автобусного сообщения) примерно в 2 раза.

Предполагается, что внутри города передвижение личного транспорта будет запрещено или, во всяком случае, существенно ограничено. Парковки личных автомобилей и конечные остановки «внешнего» общественного транспорта будут расположены у так называемых хабов (пересадочных узлов); предположительно их будет пять штук. Главный хаб соединит УГС со станцией Трехгорка белорусского направления, а с хаба южного направления возможно присоединение к ветке аэроэкспресса. Кроме того, московские власти собираются проложить до УГС линию метро (территория УГС войдет в состав «Большой Москвы»). Правда, станция метро (предположительно «Солнечная») будет находиться не на территории УГС, и до УГС придется еще добираться автобусом или иным транспортом.

Внутренние перевозки будут обеспечивать экологически чистые автобусы и «такси» (PRT — Personal Rapid Transit). Жители города также смогут, предположительно, передвигаться на велосипедах. Весь бензиновый транспорт предполагается оставлять на перехватывающих парковках (предположительно 8–12 тысяч машиномест). Такая организация движения внутри УГС позволяет достичь системного оптимума (управляемые транспортные потоки по второму принципу Вардропа) за счет полной информации обо всех участниках движения внутри УГС и управляемости процессом движения.

В будущем основную нагрузку по обеспечению внешних пассажирских потоков должен принять на себя общественный транспорт. Такое утверждение следует из того, что «внешний» общественный транспорт предполагается сделать скоростным, доступным по цене и комфортным, и, согласно первому принципу Вардропа (каждый участник движения стремится достичь конечного пункта поездки при минимальных затратах: временных, финансовых, моральных), общественный транспорт станет предпочтительней для пользователей.

Предполагается, что население УГС составит примерно 45 тысяч человек, из которых примерно 30 тысяч будут жить в городе постоянно (ученые, студенты и преподаватели университета, сотрудники подразделений компаний и т. д.), еще 15 тысяч будут

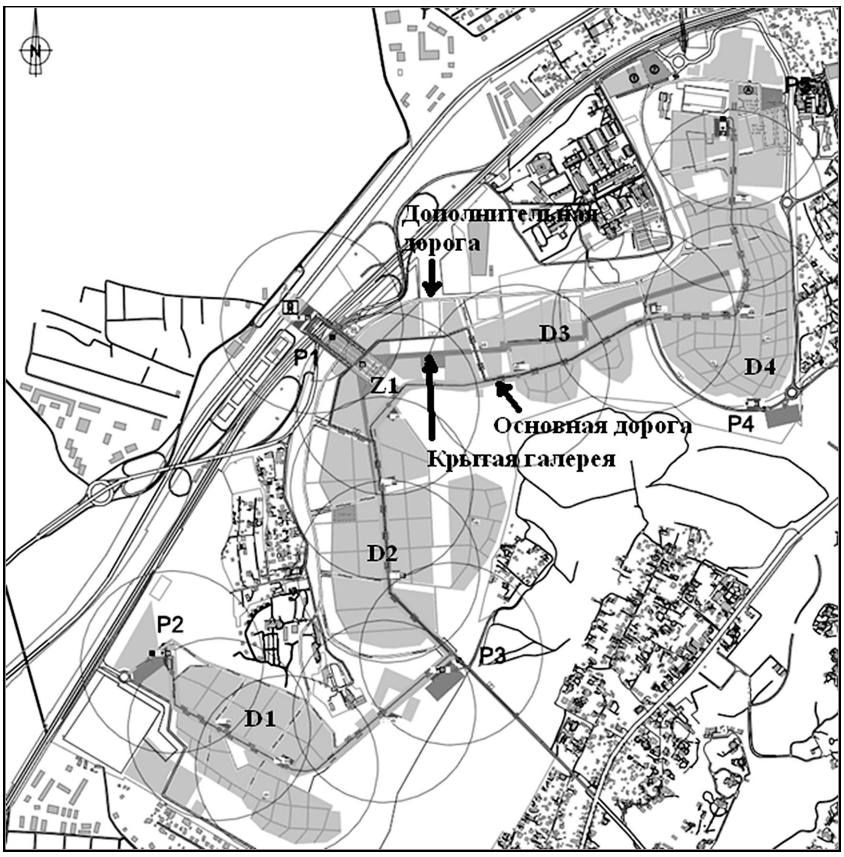

Рис. 1. Схема доступа к УГС и схема внутренней дорожной сети

приезжать в УГС только днем на работу и уезжать вечером, преимущественно в будние дни.

6. Построение общей схемы ЛММ транспорта

Исходя из выявленных предположений и допущений, можно строить математическую модель транспортных потоков УГС. Основным положением, основанным на анализе ограничений и допущений, будет вывод о том, что при движении человек переходит из одной среды (УГС) во внешнюю среду, не построенную по принципам УГ, и наоборот.

То есть исходя из этого положения, общую модель транспортных потоков можно разделить на независимые модели: модель входящих и исходящих транспортных потоков УГС и модель внутренних транспортных потоков УГС. Так как транспортные потоки непересекающиеся, движение внутри УГС и до/от УГС подчинено своим независимым закономерностям (за исключением движения от пересадочных хабов входящего потока до места назначения внутри УГС и обратно).

7. Построение ЛММ входящих и исходящих транспортных потоков УГС

Можно утверждать, что УГС является «центром притяжения» для 15 тыс. пользователей, который ежедневно въезжают и выезжают из различных шлюзов УГС (хаб, пересадочная станция, перехватывающая парковка, въезд в УГС и т. д.). Для моделирования такой ситуации выбрана гравитационная модель для описания входящего и исходящего транспортных потоков УГС.

В этой модели суммарный объем въезда/выезда в/из УГС может быть описан следующей математической моделью:

$$\rho_{ij} = s_i\, d_j / f(c_{ij}), \quad \sum_{j=1,n} \rho_{ij} = s_i \sum_{i=1,m} \rho_{ij} = d_j,$$

$$\rho_{ij} \geqslant 0, \quad i \in T_S, \quad j \in T_D$$

или:

$$\rho_{ij} = \alpha_i\, \beta_j\, s_i\, d_j\, f(c_{ij}), \quad i \in S, \quad j \in D,$$

где ρ_{ij} — общий объем корреспонденции на въезд от источника i до въездного шлюза УГС j и выезд в обратном направлении,

s_i — общий объем въезжающих в УГС из источника i (источником можно считать населенный пункт, из которого поток въезжает в УГС, или вид транспорта, с помощью которого осуществляется въезд в УГС, или путь (дорога, шоссе, ж/д ветка) подъезда к УГС),

d_j — общий объем выезжающих из УГС через выездной шлюз j,

c_{ij} — удельные затраты на передвижение от источника i до шлюза j для въезда/выезда в/из УГС; при этом считаем, что используется первый принцип Вардропа (стремление к минимизации затрат),

$f(c_{ij})$ — функция тяготения к соответствующим маршрутам движения (тип транспорта, маршрут, приносящий минимум издержек),

T_S — множество источников для поездки до УГС,

T_D — множество шлюзов для въезда/выезда в/из УГС,

α_i — калибровочный коэффициент для потока на въезд в УГС,

β_j — калибровочный коэффициент для потока на выезд из УГС.

Калибровочные коэффициенты α_i и β_j определяются как:

$$\alpha_i = \frac{1}{\sum\limits_{j \in TD} \beta_j d_j f(c_{ij})},$$

$$\beta_j = \frac{1}{\sum\limits_{i \in TS} \alpha_i s_i f(c_{ij})}.$$

Предположительно мы имеем дело с совместной системой, так как транспортные потоки на въезд и выезд УГС равны (размер потоков $\approx$ 15 000 человек, распределение по пересадочным хабам, парковкам точно неизвестно):

$$\sum_{i \in TS} s_i = \sum_{j \in TD} d_j.$$

Аппроксимировать функцию тяготения на данном этапе создания концепции можно следующим выражением: $f(c_{ij}) = \exp\left(-\gamma c_{ij}^{\theta}\right)$; при расчете трудовых миграций эмпирические коэффициенты формулы обычно принимают $\gamma \approx 0,065$, $\theta \approx 1$ (см. [2–4]).

Значения α_i и β_j следует определять итеративно, например, при следующих начальных условиях (следующем начальном заполнении матрицы корреспонденций):

$$\rho_{ij} = \frac{s_i d_j f(c_{ij})}{\sum\limits_{l \in TD} d_l f(c_{il})}.$$

Каждая итерация состоит из последовательности операций вычисления матрицы

$$\varsigma_{ij}^k = \begin{cases} \dfrac{\rho_{ij} k d_j}{\sum\limits_{i \in TS} \rho_{ij}^k}, & \text{если } \sum\limits_{i \in TS} \rho_{ij}^k > d_j, \\ \rho_{ij}^k - \text{в противном случае}, \end{cases}$$

$$q_i = s_i - \sum_{j \in TD} \varsigma_{ij}^k, \quad r_j = d_j - \sum_{i \in TS} \varsigma_{ij}^k,$$

$$\rho_{ij}^k = \varsigma_{ij}^k + \frac{q_i r_j f(c_{ij})}{\sum\limits_{l \in TD} r_l f(c_{il})}.$$

Вычислительные эксперименты на подобных моделях, даже при наличии матрицы корреспонденций размером 1000×1000, показывали сходимость матрицы за $k \approx 5$–10 итераций.

На практике у нас получается матрица меньшего размера, так как количество шлюзов УГС небольшое, количество предполагаемых источников тоже. Поэтому предложенная модель должна хорошо работать для случая моделирования потоков для УГС, где размер матрицы существенно меньше.

Модель не учитывает, как каждый из участников движения добирается до УГС, взаимовлияния различных путей въезда/выезда. Однако, на данном этапе разработки концептуальной модели этим можно пренебречь в пользу предположения, что при достижении УГС каждый участник минимизирует издержки на перемещение (временные, финансовые и др.). Тем более что сейчас точно неизвестно, как 15 000 человек будут размещены внутри УГС, и, следовательно, какие точки пересадки (хабы, перехватывающие парковки, станции метро и ж/д) предпочтут в качестве локального «центра притяжения» УГС.

8. Построение ЛММ внутренних транспортных потоков УГС

Модель строится из основного предположения, что внутренние транспортные потоки являются максимально управляемыми. Поэтому в качестве основы моделирования можно выбрать задачу достижения максимального «системного равновесия» при передвижении по городу. Системное равновесие (второй принцип Вардропа) выполняется при условии максимальной информированности, что достигается в свою очередь посредством постоянного контроля и информирования участников движения системой управления УГС.

Пики нагрузки на внутреннюю транспортную систему УГС наступают предположительно утром (около 8:00–11:00) при необходимости развозить при-

езжающих от транспортных хабов до пункта назначения внутри УГС и в обратную сторону вечером (предположительно 17:00–20:00). Нагрузка в это время на транспортную систему УГС должна (с учетом предположений, изложенных выше) увеличиваться в 1,5–2 раза и более.

Здесь также нужно учесть, что внутри города резиденты, гости и нерезиденты перемещаются примерно в то же самое время (8:00–11:00, 17:00–20:00) к/от «внутренним центрам» притяжения: местам работы или учебы. Перемещения производятся, кроме транспорта, также пешком и на велотранспорте. Кроме того, существует для школьников и детсадов неполного дня промежуточное время (12:00–15:00) для перемещения от мест учебы.

В выходные дни поведение объектов УГС (резиденты, нерезиденты, гости) можно оценить как движение к местам отдыха, досуга, развлечений, спортивным учреждениям и др. При этом выходным днем может быть однозначно воскресенье, и для большинства объектов — также и суббота. Потоки движения в выходные дни можно определить как более неравномерные, чем в будни; основная интенсивность приходится (предположительно) на 10:00–21:00, пик интенсивности, однако, снижен (предположительно) относительно пиков будних дней в 1,5–2 раза. Центры притяжения изменяются.

Общая мощность потока оценивается как 30–45 тыс. человек в рабочие и выходные дни. Применить ту же гравитационную модель (см. п. 4) для оценки движения пешеходов и велосипедистов вполне оправдано, при этом приблизительно известны центры притяжения, их состав: места работы, учебы для будних дней — с понедельника по субботу, места досуга, магазины, места отдыха, учреждения культуры и др. для выходных — субботы и воскресенья. Примерные оценки расстояний для детских образовательных учреждений (школы, детские сады) — см. [1]. Известны также максимальные расстояния из генерального плана УГС (рис. 1).

А именно, можно предположить, что движение из секторов D1, D4 (Южный и Северный районы) и Z1 (центральная гостевая зона, непосредственно примыкающая к центральному хабу), будет осуществляться в стороны Технопарка и Университета (D2 и D3) соответственно, которые выступают в качестве центров притяжения, часы пик ориентировочно 8:00–11:00. D1, D4, Z1 предположительно выступают как центры притяжения для обратного движения, часы пик 17:00–20:00. Распределение потока на этапе концепции можно принять за нормальное (или логнормальное, или логистическое, или гамма-). Мощности потоков можно принять в 15 000 человек из/в D1, D4, Z1. Кроме того, существуют потоки в образовательные учреждения: до 350 м от места проживания для дошкольных до 750 м для начальных школ; остальные можно учесть как перемещения в зоны D2, D3 и обратно. Зимой увеличивается поток людей, пользующихся для перемещения по городу крытой галерейной улицей.

Упрощает контроль и управляемость внутренним движением в УГС то, что предположительно общественный транспорт, велосипеды, пешеходы двигаются по выделенным дорогам. Средства такси и PRT (Personal Rapid Transit) могут двигаться как в общем потоке, так и по отдельным выделенным линиям (монорельс, выделенные безрельсовые или рельсовые трассы).

Согласно генеральному плану УГС предполагается, что граф дорожной сети будет состоять из основной магистрали, дополнительной магистрали, крытой пешеходной галерейной улицы (см. рис. 1). От данных магистралей будут отходить боковые ответвления, на которых образуются управляемые перекрестки.

Основную сложность при контроле дорожной обстановки представляют перекрестки, оснащенные светофорами. В простейшем случае контроль перекрестков можно осуществлять с помощью контроля плотности транспортных потоков, чтобы не допускать их скопления и существенных временных задержек. Поскольку не до конца определены возможные потоки транспорта по магистралям УГС, можно использовать лишь прогнозные математические модели с их наложением на граф сетей городских улиц.

Так как каждая единица подвижного состава транспортной системы УГС, предположительно, снабжена устройством, позволяющим контролировать ее местоположение искорость, контроль плотности потока становится тривиальной задачей. Оценка плотности потока осуществляется наоснове расчета последующей математической модели.

Плотность потока в простейшем случае (средства контроля могут определять как скорость, так и дистанцию, или размеры транспортного средства):

$$\rho(V) = \frac{1}{d(V)},$$

где $d(V)$ — динамический габарит (дистанция видимости), т. е. среднее безопасное расстояние при данных метеоусловиях и скорости движения V при ограничении $V \leqslant V_{\max}$.

$$d(V) = L + C_1 V + C_2 V^2,$$

где L — длина транспортного средства,

C_1 — постоянная, характеризующая среднее время реакции водителя,

C_2 — коэффициент пропорциональности тормозному пути.

Таблица 1

Значения коэффициентов пропорциональности тормозного пути

	Сухой асфальт, с^2/м	**Мокрый асфальт, с^2/м**	**Обледенение дороги, с^2/м**
Значение C_2	0,029	0,057	0,165

Значения C_1 обычно выбираются из диапазона 0,4–0,6 с. Значения C_2 зависят от метеоусловий, рекомендуется выбирать следующие значения коэффициента пропорциональности (см. табл. 1). Обоснование выбора значений коэффициентов C_1 и C_2 см. [5, 6].

Общую математическую модель оценки плотности транспортных потоков на графе дорожной сети УГС можно описать системой дифференциальных уравнений плотности потока для ребер графа (дорог). В этом случае мы получаем прогнозную модель, на основании которой можно моделировать любую загруженность любой из транспортных магистралей УГС (критичными ребрами графа можно пометить 2 дороги — основную и дополнительную).

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \min\Big\{ \sum_{j:j\to i} \beta_i^j \min\{\rho_j v_j, Q_j^{\max}\}, \min\big\{(\rho_i^{\max} - \rho_i)\, w_i, Q_i^{\max}\big\}\Big\} - \Big(\sum_{k:i\to k} \beta_k^i \min\{\rho_i v_i, Q_i^{\max}\}\Big) \times \min\Big\{1, \frac{\min\{(\rho_k^{\max} - \rho_k) w_k, Q_k^{\max}\}}{\sum\limits_{l:l\to k} \beta_k^l \min\{\rho_l v_l, Q_l^{\max}\}}\Big\},$$

где ρ_i — плотность потока на i-м ребре (дороге) дорожной сети УГС (количество транспортных средств на единицу длины пути за заданное время t),

β_i^j — доля потока на j-м ребре, ответвляющаяся на ребро i, а β_k^i — доля потока на k-м ребре, на которую уходит часть потока с i-го ребра и т. д. (в общем случае можно считать $\sum\limits_{k:i\to k} \beta_k^i = 1$, однако, если учитывать задержки, связанные с наличием светофоров, получим неравенство $\sum\limits_{k:i\to k} \beta_k^i < 1$),

v_j — скорость движения на j-м ребре (улице, дороге),

$Q_i^{\max}$ — максимально допустимая интенсивность потока на i-м ребре ($Q_i^{\max}$ — максимально возможное количество транспортных средств, проходящих за заданное время t через ребро i),

$\rho_i^{\max}$ — предельно допустимая плотность потока на i-м ребре (максимально допустимое количество транспортных средств на единицу длины пути за заданное время t),

w_i — скорость роста затора на ребре i ($w_i = Q_i^{\max}/(n_i^{\max} - -n_i)$, где $Q_i^{\max}$ — максимально возможная интенсивность потока на ребре i за время t, $n_i^{\max}$ — максимально возможное количество транспортных средств на ребре i, n_i — количество транспортных средств на ребре i за время t).

Необходимо сделать следующие допущения для описанной выше математической модели:

а) Данная модель не учитывает так называемых фазовых переходов потоков транспорта F–S–J, однако такое допущение вполне оправдано, так как мы имеем дело не с автобаном, на котором скорости движения могут быть не ограничены, и изменение скоростей критично для формирования фазовых переходов, а также количество автомобилей и полос движения могут быть большим. Заменой моделирования фазовых переходов или вероятности их возникновения должна стать модель поиска «бутылочных горлышек» на графе дорог, связанных с ремонтом, авариями на отдельных полосах и т. д.

б) Второе допущение предполагает, что при наличии выделенных полос движения заторная ситуация маловероятна. Тем не менее, контроль заторов должен быть заложен в систему управления. Математическая модель контроля заторов выглядит следующим образом: осуществляется перестройка системы управления на режим пропуска затора, включается обратная связь — контроль затора на основании скорости роста затора на i-м ребре (w_i), при падении скорости роста затора ниже допустимой (эта величина должна быть задана директивно на этапе системного проектирования УГС) или при уменьшении плотности потока, система переходит обратно в нормальный режим. Если нормальный режим не установлен спустя заданное время $T_{\text{Дир.}}$, автоматически вызываются соответствующие службы полиции для разбора ситуации «на месте».

В последующем, на этапе имитационного моделирования должна быть оценена вероятность «не превышения» $T_{\text{Дир.}}$, то есть

$$P(T_{\text{РежимПроп.}}) \geqslant P(T_{\text{Дир.}}).$$

В первую очередь имитационная модель должна быть построена для основной и дополнительной

дороги УГС (рис. 1). Допускается, что сток транспортных средств с основной и дополнительной магистралей проходит на специальных выделенных полосах движения и не препятствует основному потоку по данным магистралям. Аналогично приток машин на основную и дополнительную магистрали производится по специальным разгонным полосам и также не препятствует основному потоку.

Преимущества движения на регулируемых перекрестках при моделировании должны отдаваться основной и дополнительной магистралям при отсутствии заторов на примыкающих улицах. В случае возникновения заторов на боковых магистралях включается режим пропуска, затем преимущество в движении опять переходит к основной и дополнительной магистралям.

9. Заключение

Несмотря на то, что пример ЛММ транспорта разрабатывался по предложенной методологии на этапе создания концепции УГС, приведенные в работе методология моделирования и разработанные модели могут использоваться в качестве математического аппарата при разработке имитационной модели на этапе рабочего проектирования системы управления УГС и подобных проектов построения городов, комфортных для проживания.

Представленная методология учитывает характеристики расположения УГ, выбор способа взаимодействия с системой управления УГ, выбор типа ЛММ в зависимости от характеристик УГ и концептуальных положений о характере движения.

Представленный пример ЛММ служит формальным описанием, полученным с помощью разработанной методологии, определяющим характер перемещения как вне города к центрам притяжения, меняющимся в течении рабочего дня, так и внутри города — управляемые транспортные потоки с максимальным информированием участников движения. На этапе технического проектирования, исходя из математических уравнений моделей, приведенных в данной статье, могут быть подобраны оптимальные параметры дорожно-транспортной системы УГ (длина съездов, количество полос движения, расстояния между перекрестками и т. д.), способные удовлетворить максимальной расчетной пропускной способности. Сами модели скорее всего также будут модернизированы в процессе проектирования и смогут использоваться в качестве математического аппарата программ имитационного моделирования, в том числе включая и визуализацию результатов моделирования.

Разработанные модели транспорта «гравитационная» (внешние транспортные потоки УГ) и «системное равновесие» (внутренние транспортные потоки УГ), а также описанные примерные сценарии движения служат иллюстрацией реализации методологии на практике. Данные модели и методология их построения могут служить основой для дальнейшего детального моделирования системы управления транспортной подсистемы городов, построенных по принципу умных городов и выработки необходимых решений для имитационного моделирования и дальнейшего проектирования.

Так, например, можно будет подобрать, не прибегая к натурному моделированию, оптимальные параметры подъездных путей, спланировать заранее оптимальное количество единиц общественного транспорта, направлений перемещения личного транспорта, заложить средства на модернизацию дорожно-транспортной сети подъездов к УГС, оптимизировать затраты на данную модернизацию до начала реконструкции.

Представленная ЛММ, примененная к моделированию транспорта внутри УГС, служит примером оптимизации движения транспорта внутри города, согласно которой можно скорректировать градостроительные планы до начала строительства, что позволит сэкономить значительные средства на перестройку и модернизацию дорожно-транспортной сети УГС или подобных УГ в будущем при наступлении условий реальной эксплуатации. Кроме того, применение моделирования по построенным моделям позволит выработать нормативы (временные, надежностные) для оптимизации выбора технических и инфраструктурных решений при разработке транспортной составляющей УГС и других городов, построенных по принципу УГ.

Применение методологии разработки ЛММ в будущем позволит выработать стандарт для градостроительства в целом и транспорта в частности при дальнейшем проектировании и реализации проектов умных городов.

Литература

1. Зеленый кодекс. Инновационный центр «Сколково», 2011. 135 с.
2. *Шацкий Ю. А.* Расчет схемы расселения и трудовых корреспонденций при разработке генерального плана города // Развитие системы городского транспорта. Киев, 1971. № 4. С. 3–14.
3. *Швецов В. И.* Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2003. № 11. С. 3–46.
4. *Швецов В. И.* Алгоритмы распределения транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2009. № 10. С. 148–157.

5. *Иносэ Х.*, *Хамада Т.* Управление дорожным движением. М.: Транспорт, 1983.
6. *Бабков В. Ф.* Дорожные условия и безопасность дорожного движения. М.: Транспорт, 1982.
7. *McCrea J.*, *Moutari S.* A hybrid macroscopic-based model for traffic flow in road networks // European Journal of Operational Research. 2010. V. 207. Issue 2. P. 676–684.
8. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / Гасников А. В., Кленов С. Л., Нурминский Е. А., Холодов Я. А., Шамрай Н. Б.; *Приложения*: Бланк М. Л., Гасникова Е. В., Замятин А. А. и Малышев В. А., Колесников А. В., Райгородский А. М.; Под ред. А. В. Гасникова. М.: МФТИ, 2010. 362 с.
9. Умный город против транспортных проблем, [Электронный ресурс], http://www.forbes.ru/sobytiya/avtomobili/78131-umnyi-gorod-protiv-transportnyh-problem#comments.

Славин Олег Анатольевич. Зав. лаб. ИСА РАН. Д. т. н. Окончил в 1988 г. МИРЭА. Количество печатных работ: 69. Область научных интересов: распознавание образов, искусственный интеллект, моделирование электромагнитных процессов. E-mail: oslavin@cs.isa.ru

Соловьев Александр Владимирович. Вед. н. с. ИСА РАН. К. т. н. Окончил в 1994 г. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Количество печатных работ: 27. Область научных интересов: системный анализ, системы управления базами данных, теория надежности, влияние человеческого фактора, математическое моделирование, электронный документооборот. E-mail: alexsol@cs.isa.ru

Соловьев Андрей Валентинович. Научный сотрудник ИСА РАН. Окончил в 1996 г. МГУ. Количество печатных работ: 2. Область научных интересов: информационно-аналитические системы, распределенные системы оперативного учета, системы высокой степени доступности, системы распознавания образов (в части идентификации личности). E-mail: zen@cs.isa.ru