

Математическое моделирование автотранспортных потоков
(обзорный реферат)

Семенов В.В.

18 марта 2003 г.

Аннотация

Проанализированы транспортные проблемы в Москве. В числе прочих мер по решению проблем указано на необходимость и роль моделирования в решении этих проблем. Приведена классификация математических моделей автотранспортных потоков. Сделан неформальный обзор основных моделей. Указаны перспективные направления дальнейшего исследования автотранспортных потоков.

Оглавление

0.1	Транспортная ситуация в Москве	2
0.1.1	Проблемы	2
0.1.2	Причины	2
0.1.3	Решения	3
0.1.4	Выводы	4
0.2	Моделирование транспортных потоков	6
0.2.1	Исторические замечания	6
0.2.2	Классификация моделей	8
0.2.3	Методы привязки модели к улично-дорожной сети (УДС)	9
0.2.4	Выводы	9
0.3	Обзор математических моделей транспортного потока	10
0.3.1	Динамические модели транспортного потока	10
0.3.2	Моделирование загрузки транспортных сетей городов	14
0.3.3	Современные теории транспортного хаоса	17
0.3.4	Обзор программных комплексов моделирования	18
0.3.5	Выводы	21
0.3.6	Перспективные задачи	22

*"Traffic is like music," Barrett said with childlike exuberance.
"Traffic constructs itself like a singer sings. It's the same song.
But everyday, the song is a little bit different."*¹

0.1 Транспортная ситуация в Москве

0.1.1 Проблемы

Согласно [7] и [8] для дорожно-транспортной ситуации в целом по городу характерно:

- очень высокая плотность транспортных потоков;

Проведенные в 1999 и 2001 годах Центром исследований транспортной инфраструктуры г. Москвы (ЦИТИ) замеры показали, что по транспортной сети Москвы в дневное время одновременно находится в движении 160 – 180 тысяч автомобилей. Увеличение этого числа до 230 – 250 тысяч приводит к образованию заторов. Например в один из дней 1998 года, когда во время сильного снегопада движение на улицах к вечеру было полностью парализовано, по экспертной оценке ЦИТИ на улицах города могло находиться ≈ 300 тысяч автомобилей.

- низкая средняя скорость движения;
- частые предзаторные и заторные ситуации.

Примечательно, что точного определения понятия „затор“ и „пробка“ не существует.

Согласно [6] для центра Москвы и всего города характерны следующие проблемы организации дорожного движения:

- значительная перегруженность улично-дорожной сети;
- наличие большой доли транзита через центр города;
- трудности движения из-за не правильных парковок;
- общественный транспорт не справляется с объемами пассажиропотоков и не является достойной альтернативой использованию личного транспорта;
- низкая дисциплина участников дорожного движения и неадекватный надзор.

0.1.2 Причины

Согласно [7] и [8] ключевыми причинами являются:

- неоптимальное распределение транспортных потоков по УДС:

Анкетное обследование, проведенное ЦИТИ показало следующее: основной причиной выбора водителями более длинного маршрута (причем зачастую, водитель сначала едет вообще в противоположном от пункта назначения направлении) является плохая организация дорожного движения. По этой причине $\approx 31\%$ водителей выбирают более длинный (в объезд) маршрут. Второй причиной является неразвитость сети. Из-за этого $\approx 20\%$ водители вынуждены ехать по более длинному маршруту (т.к. короче маршрута просто нет, но его можно проложить). Кроме того неразвитость сети выражается в нехватке мостов через реку и железные дороги, объездов и проездом по паркам и площадям.

¹„Движение транспорта напоминает музыку“, с детской искренностью говорит Баррет. „Движение возникает подобно песне. Это тоже песня. Но каждый день эта песня немного другая“. Примечание: Chris L. Barrett – участник проекта моделирования транспортных потоков в исследовательском центре Лос-Аламоса.

- недостаточность управления движением;

Сюда относится:

- отсутствие приоритета движения общественного транспорта;
- неоптимальность организации движения как на уровне дорожных знаков (ограничение/запрет создается по субъективному решению) и неразвитость автоматизированных систем управления движением (АСУД).

Примечание: АСУД бывают 3-х уровней: 1-й уровень – светофор, второй – линейка светофоров, третий – система регулирования с автоматической оптимизацией. Система СТАРТ – просто сеть светофорного регулирования всего города.

- недоработки по автостоянкам;

Эта проблема имеет следующие особенности: кроме того, что в Москве действительно недостаточно автостоянок, недостаточен надзор за нарушением парковок. К примеру, на ул. Новый Арбат машины припаркованы вдоль дороги, что уменьшает ее ширину.

- опережение спроса на движение над его удовлетворением.

Согласно [6] ни один крупный город мира не решил проблему затрудненного движения только путем увеличения пропускной способности дорог: *”Спрос на передвижение всегда был столь оживлен, что увеличение пропускной способности дорог приводило лишь к возникновению нового спроса, вновь порождавшего проблему затрудненного движения”*.

Множество городов, особенно в Западной Европе, например, Цюрих, справились с ситуацией путем грамотной организации движения и управления спросом на перевозки.

В Москве, как и в других крупнейших мегаполисах мира, сложилась парадоксальная ситуация – спрос на перевозки в черте города растет, а финансовое и материальное положение общественного транспорта ухудшается. Один из способов противостоять этому – улучшать организацию движения. Но она обязательно должна быть увязана со стратегией развития системы общественного транспорта и с градостроительным планированием, причем стратегии развития системы автодорог и градостроительные стратегии, должны не противоречить одна другой.

0.1.3 Решения

Согласно [6] **”Транспортные проблемы являются комплексными, охватывающими обширную область управления так что измерение, наблюдение и моделирование крайне важны для разработки стратегии организации движения”**.

В [8] предлагаются следующие меры:

- уменьшение притяжения транспортных потоков сокращением/запрещением строительства новых объектов финансово-деловой и торгово-обслуживающей сферы;
- строительство многоярусных внеуличных паркингов при одновременной ликвидации неорганизованных автостоянок на проезжей части;
- введение ограничений на въезд в центральную часть города;
- вывод из центральной части города ряда учреждений и организаций;
- создание препятствий для использования центра города транзитными транспортными потоками введением режима „успокоенного движения“² на межмагистральных территориях и использование этих территорий пешеходами.

²Понижение скорости движения транспортных средств на определенной территории.

0.1.4 Выводы

1. **Зачем нужно моделирование?** Можно ли обойтись без моделирования? Можно ли просто рассчитывать потоки по известным формулам? Простой пример показывает, что нет.

Пример. Для того, чтобы разгрузить перекресток, например, установив указатель поворота направо проводят инженерные расчеты. Но для вычислений требуется знать, какое количество автомобилей в среднем поворачивает направо. А все дело как раз в том, что никто туда не поворачивает (никому туда ехать не надо, а для того, чтобы разгрузить перекресток, нужно часть потока пустить направо).

Более того, транспортный спрос все время подстраивается под любые управляющие воздействия. Вначале в системе возникает планируемый эффект просчитанной разгрузки каких-то участков, но через некоторое время спрос находит более свободные для движения пути и полностью загружает их. И весь эффект сводится на нет.

Можно привести несколько примеров поведения транспортного потока:

- Давно замечено, что если на каком-то перекрестке временно ломается светофор, каким бы напряженным не было через него движение, аварии случаются не чаще (в некоторых случаях даже реже).
- Если в связи с флуктуациями или случайными факторами возрастает количество заторов, то на следующий день спрос на движение снижается.

Таким образом, можно сказать, что *моделирование необходимо для принятия решений в силу того, что система обладает следующими свойствами, делающими ее непредсказуемой и трудно просчитываемой:*

- подстройка под управление и компенсация увеличения пропускной способности при развитии сети увеличением спроса и перераспределением его в новых условиях;
- непредсказуемость поведения каждого водителя (следование выбранного маршрута и манеры поведения);
- воздействие случайных факторов (ДТП, погода) и флуктуации, связанные с сезоном, праздниками и т.п.

2. Нет методов измерения количества заторов в связи с отсутствием единой точки зрения на то, что есть затор. Условно можно выделить два типа заторов, характерных для Москвы:³

- затрудненный проезд из-за перегруженности сети;
- "мертвый" затор – возникает либо в случае аварии, либо когда водители выезжают на встречную полосу с обеих сторон, в результате они "переплетаются" между собой (их еще могут заблокировать троллейбусы).

Интересно, что типичная для Москвы проблема образования предзаторных и заторных ситуаций еще до конца никем не изучена. Так с недавнего времени национальный исследовательский центр Лос-Аламос, известный как место рождения атомной бомбы, сосредоточил свои силы на исследовании транспортных потоков [9]. Вот несколько цитат:

- „Состояние дела в этой области на сегодня таково, что, не смотря на значительный прогресс, полное *понимание природы автомобильных пробок еще не достигнуто*“. Ученые говорят, что они пока находятся ближе к пониманию процессов зарождения Вселенной, чем образования автомобильных заторов.

³Точка зрения специалистов ЦИТИ.

- „Физика предлагает широкое разнообразие методов для объяснения движения. Но все еще остается много открытых проблем“, говорит немецкий физик Kai Nagel, ключевая фигура в проекте Лос-Аламоса.
 - Hani S. Mahmassani, профессор университета Штата Техас и, наверное, ведущий американский эксперт в теории движения автомобильных потоков, говорит: „Причина внезапного перехода от режима свободного движения к режиму „stop-and-go“ остается одной из тайн нашего времени“.
3. В проведенных в 2000 – 2001 г.г. ЦИТИ разработках требований к программным комплексам для моделирования работы транспортной системы Москвы в рамках проекта ПРООН RUS/97/029 ”Стратегия развития транспорта г. Москвы. Программа действий и кратко/среднесрочных инвестиций” разработаны задачи, подлежащие решению с помощью моделирования и определены требования к программным комплексам моделирования, позволяющим решать эти задачи.

Вот выдержка из отчета, касающаяся задач моделирования:

”...Задачи, подлежащие решению с помощью моделирования

1. Классификация задач моделирования.

В масштабе всей городской агломерации могут требовать решения, например, следующие вопросы:

- что может повлечь за собой изменение во внешних транспортных связях;
- как изменится работа транспортной системы при введении новых элементов: линий метро, радиальных или кольцевых автомагистралей;
- каких изменений в транспортной системе города может потребовать строительство нового жилого района или расположение емкого центра притяжения посетителей;
- какого перераспределения потоков транспорта и пассажиров следует ожидать в случае временного закрытия или ликвидации какого-либо элемента транспортной системы;
- как может повлиять на работу системы введение экономических санкций (плата за проезд по магистрали, за въезд в зону центра, введение зонного тарифа в метро и т.п.);
- какой эффект может дать широкое внедрение автоматизированных систем управления уличным движением,
а также многие другие вопросы.

Могут возникать и задачи локального порядка: какой эффект дает та или иная перепланировка перекрестка или группы перекрестков, расширение проезжей части улицы, изменения в организации движения на пересечениях, оптимизация светофорного регулирования в узле, изменение условий пересадки пассажиров где-либо и т.п.

Полный перечень возможных задач в области дорожно-транспортного комплекса огромен и едва ли может быть в полной мере сформулирован в условиях только зарождающейся отечественной практики моделирования.

Работа всех элементов городской транспортной сети, как и различных видов пассажирского транспорта, взаимосвязана. Тем не менее, с учетом этой связности на практике может возникнуть необходимость анализа работы отдельных элементов:

- улично-дорожной сети;

- массового пассажирского транспорта, в т.ч.:
 - уличного;
 - внеуличного;
- грузового движения.

Первые практические шаги в моделировании для Москвы уже подтвердили необходимость такого разделения.

2. Сроки прогнозирования.

Моделирование транспортной ситуации может производиться на любой расчетный срок – от оперативных задач сегодняшнего дня до долгосрочной (20-30 лет) перспективы развития города. Условно задачи прогнозирования можно разделить на:

- долгосрочные (отдаленная перспектива в 10 и более лет),
- среднесрочные (обычно задачи I очереди возможного развития – около 5 лет),
- краткосрочные (анализ последствий намечаемых мероприятий ближайших дней, недель, месяцев),
- оперативные (в реальном масштабе времени).

Способы решения перечисленных задач (кроме оперативных) принципиально одинаковы, разница состоит в информационных (входных) данных и степени достоверности ...”

0.2 Моделирование транспортных потоков

0.2.1 Исторические замечания

Основы математического моделирования закономерностей дорожного движения были заложены в 1912 году русским ученым, профессором Г.Д. Дубелиром.

Первостепенными задачами, послужившими развитию моделирования транспортных потоков, явилось *изучение и обоснование пропускной способности магистралей и их пересечений*.

В настоящее время *пропускная способность дороги* является *важнейшим критерием*, характеризующим функционирование путей сообщения. Под пропускной способностью понимают максимально возможное число автомобилей, которое может пройти через сечение дороги за единицу времени. Для скоростных дорог важным является выполнение условия *обеспечения заданой скорости сообщения*.⁴

Первая попытка обобщить математические исследования транспортных потоков и представить их в виде самостоятельного раздела прикладной математики была сделана Ф. Хейтом [4].

В 60 – 70-е годы вновь возник большой интерес к исследованию транспортных систем. Эта заинтересованность проявилась, в частности, в финансировании многочисленных контрактов, обращении к авторитетным университетским ученым – специалистам в области математики, физики, процессов управления. Среди наиболее известные из них – Нобелевский лауреат И. Пригожин, специалист по автоматическому управлению М. Атанс, автор фундаментальных работ по статистике Л. Брейман.

Сегодня имеется очень обширная литература по изучению автотранспортных потоков, включая моделирование. Большинство исследований, направленных на решение существующих и потенциальных проблем ежегодно финансируются. Несколько академических журналов посвящены исключительно динамике автомобильного движения, регулярно издаются новые учебники, число статей, изданных каждый год по этой теме исчисляется сотнями.

⁴В специальной литературе встречаются такие модификации понятия пропускной способности, как *теоретическая, номинальная, эффективная, собственная, практическая, фактическая* и др.

При моделировании автомобильного движения специалисты столкнулись с выбором между макроскопическим моделированием движения, рассматривая потоки как непрерывные (подобно моделированию текущей через трубу воды), или моделировать каждое транспортное средство в отдельности. В литературе имеется много примеров обоих подходов.

Макроскопические модели обладают тем преимуществом, что являются математически компактными, и могут быть представлены системой дифференциальных уравнений, решение которой не требует больших вычислительных ресурсов. Этот метод имеет много общего с гидро- и газодинамикой и теорией информации, и больше подходит для систем, которые состоят из относительно однородных частиц с ограниченными и предсказуемыми взаимодействиями. Общим вопросом, возникающим при использовании этого подхода является нахождение факторов, позволяющих уравнениям более близко описывать наблюдаемую сложность реально систем движения.

С недавнего времени появилось много литературы, рассматривающей при моделировании транспортный поток как дискретный и моделированию движения каждого автомобиля. Поначалу усилия, направленные на получение результата в этом направлении реализовывались в виде крупных проектов требовавших большого бюджета из-за необходимости значительных инвестиции в вычислительную технику и создание программного обеспечения. Общая стратегия того времени заключалась в том, чтобы смоделировать небольшие транспортные системы на небольших компьютерах и экстраполировать результаты на суперЭВМ (Mahmassani и другие, 1990, http://www.gis.usu.edu/sanduku/public_html/dissertation/outline/node105.html) также использовала параллельную работу нескольких обычных ЭВМ.

После прогресса в развитии компьютеров, исследователи стали уделять основной интерес исследованию динамического поведения транспортного потока. Было замечено, что многие сложности в динамике поведения систем возникают как свойства взаимодействия между индивидуальными транспортными средствами в моделях. Resnic (1996) описал, как сложные паттерны движения возникли в системах, где индивидуальным транспортным средствам задавали чрезвычайно простые правила в неофициальных экспериментах, проводимых студентами средней школы. Более формальное описание сложного поведения в транспортных системах рассмотрено Барретом (National Laboratory Los Alamos) с использованием несколько более сложных наборов правил. Успехи в исследовании сложного поведения в микромоделях привели некоторых исследователей к предположению о том, что автомобильное движение можно рассматривать как *самоорганизующуюся систему* (Nagel, 1996), а *применение этих принципов стало частью структуры главного проекта моделирования транспортных систем в национальной лаборатории Лос-Аламоса*. В исследованиях по совершенствованию микромоделей стали моделировать поведение отдельных водителей, имитируя их индивидуальные решения относительно выбора маршрута движения (Nagel, 1997) и разрабатывать представление такой модели в вычислительной среде.

С проблемами программной реализации моделей связана одна очень интересная история. Известен один способ программной реализации модели по принципу сверху вниз, появившийся в результате усилий Robot Auto Racing Simulation (RARS) и Интернет-сообщества. Было объявлено соревнование по моделированию. Проектируемая компьютерная игра была запущена в Интернет в 1994 и 1995. К участию в нем мог присоединиться любой желающий.

Базовая RARS-модель была написана Митчеллом Тиминсом из Penn State University и состояла из скоростного трека с несколькими автомобилями, которые должны участвовать в гонках преследования. Автомобили были закодированы как объекты, подчиняющиеся физическим законам при движении по треку (масса автомобиля, сцепление с дорожной поверхностью, и т.д.), а восприятие их окружения, реакция на неровности трека и механизмы их ориентации на трек, были инкапсулированы непосредственно в этих объектах. При наличии программ управления для каждого автомобиля, было создавать отдельный набор инструкций, как этот автомобиль будет вести себя по отношению к другим. Но вплоть до настоящего времени по

результатам этого проекта не было написано ни одной статьи, хотя в нем были использованы ряд инновационных методов моделирования и программного кодирования.

Знаменательно, что проект RARS дал наглядную иллюстрацию того, как прогресс объектно-ориентированного программирования и совершенствования персональных компьютеров перенес приоритет в моделировании движения транспорта от крупных государственных проектов к статусу компьютерных игр.

В конце 80-х начале 90-х, в США проблемы исследования транспортных систем были возведены в ранг **проблем национальной безопасности**. К решению этой задачи были привлечены лучшие "физические умы" и компьютерная техника исследовательского центра в Лос-Аламосе, известного разработчика атомной бомбы.

0.2.2 Классификация моделей

Единой классификации моделей нет. Мы сделаем классификацию по двум признакам – что моделируется (*какие свойства транспортного потока*) и как моделируется (*какие гипотезы о связи поведения транспортного потока с его параметрами лежат в основе модели*).

Что моделируется?

1. **Параметры транспортного потока** на участке дороги/сети – это *имитационные* модели.

И м и т а ц и о н н ы е модели решают задачу построения математических моделей, способных адекватно описывать поведение участников транспортного потока и правильно воспроизводить параметры и характеристики движения.

В зависимости от того, как в этих моделях рассматривается транспортный поток, их можно разделить на

- макроскопические (автомобильный поток уподобляется движению жидкости);
- микроскопические (моделируется каждый автомобиль в потоке).

Имитационные модели позволяют оценить скорости движения, задержки на перекрестках, длину и динамику образования заторов и т.п.

Область применения: улучшение организации движения, оптимизация светофорных циклов и т.п.

2. **Загрузка транспортной сети** – это *прогнозные* модели.

П р о г н о з н ы е модели позволяют моделировать процессы передвижения населения и грузов по городу с выбором путей следования видов транспорта. Они предназначены для прогноза транспортных потоков при

- a) изменениях в транспортной сети города,
- b) смещениях потокообразующих объектов города.

Область применения: поддержка решений в области планирования развития города, анализ последствий изменений в организации движения, выборе альтернативных проектов развития транспортной сети и т.п.

Как моделируется?

- Гипотеза – состояние транспортного потока в прошлом и будущем определяется его настоящим состоянием – *детерминированные* модели.

Исследуются функциональные зависимости между отдельными показателями, например, скоростью и дистанцией между автомобилями, полагая при этом, что все автомобили равноудалены друг от друга.

- Гипотеза – состояние транспортного потока зависит от случайного сочетания ряда параметров (факторов), положенных в основу модели – *стохастические* модели.

Транспортный поток рассматривается как результат взаимодействия транспортных единиц на элементах транспортной сети. В связи с жестким характером ограничений транспортной сети и массовым характером движения в транспортном потоке складываются отчетливые закономерности в образовании очередей, интервалов, скоростей, загрузок по полосам дороги и т. п. Эти закономерности носят существенно стохастический характер, что и определяет выбор математического аппарата теории вероятностей.

- Параметры осредняются за определенный интервал времени – *статические* модели.
- Модель работает в реальном режиме времени – *динамические* модели.
- Гипотеза – поведение транспортного потока аналогично поведению сжимаемой жидкости – *модели-аналоги*.
- Гипотеза – переход между различными фазами движения транспортного потока подобен внезапным переходам, случающимся при конденсации или замерзании воды [9] (подробности в подразделе 0.3.3).

0.2.3 Методы привязки модели к улично-дорожной сети (УДС)

Наибольшее распространение получили следующие математические модели УДС:

1. Граф-модели.
 - На электронной географической подоснове (карте УДС) строится граф/орграф, вершины которого отображают узлы УДС, соединенные ребрами. Задаются правила обхода графа – организация дорожного движения (ОДД).
 - На электронной географической подоснове (карте УДС) строится граф/орграф с вершинами в узлах УДС и ребрами-дугами, повторяющими форму траектории движения транспортных средств вдоль УДС. Задаются правила обхода графа – ОДД.
2. ГИС-модели (составление УДС из моделей ее элементарных участков).
 - Электронная карта УДС разбивается на однородные элементарные участки: прямолинейные, криволинейные и участки их сопряжения. Затем строится математическое описание каждого элементарного участка.

0.2.4 Выводы

1. **Микро и макро уровень связаны** так. Самоорганизация в системе описывается на макро уровне транспортных потоков. Микро уровень связан с динамическими параметрами потоков в узлах сети, являющихся точками "бифуркации" маршрутов движения, образования заторов и т.п. Здесь уже процесс происходит на микро уровне взаимодействия автомобилей (например, затор может возникнуть из-за аварийной остановки одного автомобиля или столкновения двух).

2. Разнообразие гипотез, лежащих в основе моделирования говорит о том, что транспортные потоки – сложная система.

В литературе, в частности отмечается, что сложность задачи моделирования транспортных потоков обусловлена [11]:

- многофункциональным и многоуровневым характером транспортной системы;
- динамическим и вероятностным характером изучаемых процессов;
- активностью объекта управления, которая требует учета многочисленных психологических и социально-экономических факторов.

0.3 Обзор математических моделей транспортного потока

0.3.1 Динамические модели транспортного потока

Примечание: Используются заготовки статьи Динамические модели транспортного потока В.И. Швецова (ИСА РАН).

Макромодели (гидродинамические, кинетические).

Гидродинамические модели. Транспортный поток рассматривается как течение „сжимаемой жидкости“ со специфическими свойствами, образованной движущимися автомобилями. При этом *движение отдельных автомобилей явно не описывается.*

Фундаментальными характеристиками транспортного потока, с которыми оперируют модели этого класса, являются:

- **плотность** (количество автомобилей на единицу длины дороги),
- **поток** (количество автомобилей, проходящих через некоторое сечение дороги за единицу времени),
- **средняя скорость** автомобилей в потоке (разная на разных участках дороги).

Различаются следующие классы макромоделей транспортного потока:

- Кинематические модели (Lighthill-Whitham).
- Модели второго порядка (Kerner-Konheuser).
- Модели, основанные на кинетическом уравнении (Prigogine, Helbing).

Модель Lighthill и Whitham (1955 год), была исторически первой и наиболее простой в классе макроскопических моделей, основанных на гидродинамической аналогии. Эти модели основаны на уравнении непрерывности для плотности автомобильного потока (выражающем закон сохранения автомобилей на дороге (1)) в сочетании с гипотезой о том, что средняя скорость на участке дороги является детерминированной (убывающей) функцией плотности автомобилей на этом участке (2).

$$(1) \quad \partial_t \rho + \partial_x(\rho V) = 0,$$

где $\rho(x, t)$ – плотность, $V(x, t)$ – средняя скорость автомобилей в точке дороги с координатой x в момент времени t .

$$(2) \quad V(x, t) = V_\varepsilon(\rho(x, t)),$$

Недостатком модели является предположение о том, что средняя скорость потока $V(x, t)$ в каждый момент времени соответствует равновесному значению V_ε при данной плотности автомобилей (соотношение (2)), что делает модель неадекватной при описании движения транспортного потока на участках съезда-выезда, сужениях, а также в условиях движения „stop-and-go“, возникающего в заторах и пробках.

Модели второго порядка, кроме уравнения непрерывности используют еще динамическое уравнение для описания скорости потока. Вид уравнений, описывающих динамику основных характеристик потока, обычно постулируется на основе аналогий с известными уравнениями гидродинамики классической физики. Наиболее известной моделью этого класса является модель **Kerner-Konheuser**. На основе компьютерных расчетов этой модели был изучен процесс образования и развития *кластеров* – областей с высокой плотностью и низкой скоростью автомобильного потока.

В последние годы развивается подход, позволяющий выводить макроскопические уравнения из детального описания процесса взаимодействий автомобилей друг с другом. Движение автомобилей, изменение их скоростей, происходящее в результате их взаимодействия в потоке, описывается специальным кинетическим уравнением статистической физики. В результате усреднения кинетического уравнения получают уравнения динамики средних характеристик потока.

Модели, основанные на кинетическом уравнении основаны на описании динамики *фазовой плотности потока* – плотности распределения автомобилей по координате и скорости. Здесь закон сохранения автомобилей уже в фазовом пространстве был впервые сформулирован Пригожиным и его соавторами (Prigogine, Helbing) в 1961 г. (3)

$$(3) \quad \partial_t f + \partial_x(fv) = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{int} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{rel}$$

При построении этой модели приняты упрощения:

1. В результате обгона скорость обгоняющего автомобиля не меняется.
2. Скорость впереди идущего автомобиля в результате взаимодействия в любом случае не меняется.
3. Взаимодействие происходит в точке (размерами автомобилей и расстоянием между ними можно пренебречь).
4. Изменение скорости в результате взаимодействия происходит мгновенно.
5. Одновременные взаимодействия трех и более автомобилей исключаются.
6. По аналогии с гипотезой „молекулярного хаоса“ в классической газодинамике высказывается гипотеза „автомобильного хаоса“ – скорости автомобилей в потоке не коррелированы до и после взаимодействия.

К существенным недостаткам этой модели можно отнести:

- Неадекватность гипотезы „автомобильного хаоса“. Например, скорости автомобилей в потоке уже нельзя считать статистически независимыми.
- Неадекватность описания поведения транспортного потока, если поток является пространственно неоднородным. К примеру на свободном участке дороги быстрее движущиеся автомобили первыми достигнут конечного участка. Однако в модели с первых же мгновений на всем протяжении дороги должны сразу возникать медленно движущиеся автомобили.

Макроскопические модели имеют качественные недостатки, так как они не принимают в расчет размеры отдельных автомобилей. К примеру, при некоторых значениях параметров эти модели могут давать плотности, превышающие максимально допустимые (движение бампер к бамперу).

Микромодели

В них явно описывается движение отдельных автомобилей.

Транспортный поток представляется в этих моделях потоком взаимодействующих частиц. Способ описания этих взаимодействий определяет тип и свойства модели. Различаются следующие типы моделей:

- модели, основанные на детерминированном описании поведения частиц (варианты Carfollowing).

При описании движения в терминах *модели следования за лидером* существенным моментом является предположение о том, что движение ведомого транспортного средства определенным образом психологически связано с перемещением головного автомобиля. По мере развития теории в моделях этой группы учитывалось время реакции водителей, исследовалось движение на многополосных дорогах, изучалась устойчивость движения. Разработаны линейная и нелинейная модели следования за лидером. Они слишком детальны для анализа движения в больших транспортных системах. Их используют для анализа характеристик потока на пересечениях, регулируемых перекрестках и т.п.

- кинетические модели, основанные на статистическом описании поведения большого ансамбля частиц. Используются в основном для обоснованного вывода макроскопических уравнений движения.
- ячеечные (или клеточные) автоматы - подход, основанный на стохастическом описании динамики отдельных частиц. В моделях этого класса все непрерывные величины, такие как интенсивность потока, скорость, протяженность дороги, заменяются дискретными. Такой подход обеспечивает чрезвычайную эффективность моделей с вычислительной точки зрения. Модели этого класса с некоторой долей условности могут быть отнесены к микромоделям, поскольку под понятием „частицы“ в этих моделях понимают „порцию“ автомобилей. Этот подход является новым в теории транспортного потока и интенсивно развивается в настоящее время.

Подходы к проблеме микромоделирования в исследовательском центре Лос-Аламоса.

Гипотеза о самоорганизации сложной системы. На уровне большого города или его крупного района транспортная динамика есть результат тысяч или, в некоторых случаях, миллионов индивидуальных решений о перемещении людей и товаров между пунктами назначения[9].

Каждое такое решение основано на неполной информации о состоянии транспортной системы в целом. Поскольку полное знание о каждом состоянии транспортного потока в настоящий и последующие моменты времени получить невозможно, стратегии управления, основанные на „знании“ будущего состояния системы, могут основываться на свойствах стремления системы к *самоорганизации*. Это значит, что меры по управлению движением будут иметь тенденцию к „уравновешиванию“ паттернов движения (система „гасит“ перегрузку одних своих частей, а недогруженные части системы „догружает“). Но все же и в этом случае невозможно прогнозировать поведение отдельного водителя на сети (то, как долго он будет придерживаться

назначенного маршрута движения). А это означает, что ни водитель, ни всезнающая компьютерная система управления не смогут решить, который же из возможных путей мог бы действительно быть самым коротким или наилучшим.

Таким образом, эта возрастающая непредсказуемость и является камнем преткновения, который препятствует дальнейшему развитию.

Один из методов решения этих трудностей заключается в выстраивании последовательности действий при моделировании так, чтобы можно было решать возникающие проблемы последовательно. Наиболее прямым путем здесь представляется "восходящее микромоделирование", основанное на динамике всех перемещений, начиная с того момента, когда решения о движении уже приняты (подробнее в подразделе 0.3.4).

Динамические равновесные модели в TRANSIMS. Традиционный подход к проблеме планирования городского транспортного процесса состоит из четырех шагов:

- Воспроизводство движения: движение из пункта в убытия в пункт назначения – так называемый анализ зон движения.
- Распределение движения: после процедур генерирования поездок у нас есть только пункты убытия и прибытия, но они не отождествлены. Это делается на стадии распределения поездок. В результате, получается таблица источник-место назначения, то есть матрица корреспонденций.
- Расщепление: потоки движения могут быть распределены различными способами (например по видам транспорта – поезда, автобусы, автомобили ...).
- Assignment (распределение): транспортные потоки распределяются по маршрутам сети (им присваиваются (*assign*) эти маршруты).

В статических assignment-моделях динамические показатели потоков усредняются на выбранном промежутке времени. Однако на слишком малых промежутках статические модели уже не пригодны.

В TRANSIMS моделируется динамика движения. Данные о пунктах убытия и прибытия закрепляются за индивидуальным транспортным средством. В TRANSIMS для каждого индивидуального транспортного средства задаются все сведения о пунктах отправления-назначения, и маршрутах назначаемых элементам сети.

Итерационные прогоны модели позволяют исследовать альтернативные варианты назначения маршрутов. Несколько исследовательских групп использовали итеративные прогоны, т.н. "микромоделирования маршрутизации с обратной связью по времени движения" (*routing-microsimulation-feedback of travel-times*), чтобы получить набор самосогласованных маршрутов.

Организация самого процесса моделирования состоит из двух основных этапов:

- (a) планирование маршрута, основанное на быстром алгоритме Дейкстры (Edsger W. Dijkstra⁵), в котором используются зависимости длительности поездки от выбранного маршрута для нахождения кратчайших маршрутов, и
- (b) микромоделирование движения по маршрутам, назначенным планировщиком на этапе (a). По результатам микромоделирования программа создает файл обратной связи, используемый при последующих вызовах маршрутизатора.

⁵Упомянутый алгоритм решает следующую задачу – "В ориентированной, неориентированной или смешанной (т. е. такой, где часть дорог имеет одностороннее движение) сети найти кратчайший путь из заданной вершины во все остальные"

Клеточные автоматы (КА). Как уже отмечено выше клеточные автоматы интересны с точки зрения их высокой вычислительной скорости и сложного динамического поведения. Их огромная скорость вычисления и эффективность – результат следующих свойств, которые являются идеальными для параллельных вычислений[5]:

- (1) дискретизация пространства в идентичных ячейках j размера Δx ;
- (2) конечное число возможных состояний $g(x)$;
- (3) (параллельное) периодическое обновление $t = i\Delta t$ с элементарным временным шагом Δt , и
- (4) использование глобальных прикладных правил обновления, основанных на
- (5) коротко диапазоновых взаимодействиях с конечным (малым) числом соседних участков.

Несмотря на эти упрощения, клеточные автоматы и имеют широкую область применений, простирающуюся от реалистичных моделей зернистых носителей информации до моделирования схода лавин.

Применение КА для исследования транспортной динамики способствовало увеличению контроля за неустойчивым движением, которое является причиной возникновения режима "stop-and-go", способствующего скоплению транспорта на автострадах и в городах.

Первые клеточные автоматы для моделирования движения по автострадам были предложены Кремером (Cremer) и его коллегам (Cremer и Ludwig, 1986; Schutt, 1990), а также Нэйджелом (Nagel) и Шрекенбергом (Schreckenberg) в 1992 г. К настоящему времени накоплено огромное число публикации в этой области.

0.3.2 Моделирование загрузки транспортных сетей городов

П р и м е ч а н и е: Используются заготовки статьи Математическое моделирование транспортных потоков в сети крупного города, А.С. Алиева и В.И. Швецова (ИСА РАН).

Модели, предназначенные для анализа транспортных потоков в транспортной сети города, можно условно разделить на макромоделю и микромоделю.

Макромодели применяются для прогноза корреспонденций и загрузки сети, возникающие в результате развития, как самой сети, так и города в целом (строительство и улучшение дорог, строительство новых и изменение функциональной структуры существующих районов города и т.п.). Эти модели оперируют усредненными характеристиками движения по отдельным элементам сети (дугам и узлам).

Микромоделю применяются для анализа задержек и пропускных способностей отдельных элементов и участков сети. Эти модели используют более детальную информацию о геометрии дорог и пересечений, особенностях разметки и светофорного регулирования, чем макромоделю. Основным отличием глобальных моделей от локальных является то, что распределение участков движения по маршрутам в сети, а также вытекающие из него интенсивности движения по дугам и поворотам, являются выходом глобальных моделей, и служат входом для локальных моделей. Этим обусловлено основное различие в применении этих моделей.

Макромодели (градостроительные) предназначены для прогноза корреспонденций, транспортных потоков и основных усредненных характеристик движения в сети города.

Решение все совокупности этих задач дает так называемая классическая 4-х стадийная модель прогноза транспортных потоков:

1. Оценка объемов въезда-выезда на основе демографической и социально-экономической информации;

2. Оценка межрайонных корреспонденций;
3. Расщепление корреспонденций по видам используемого транспорта;
4. Расщепление корреспонденций по сети и прогноз загрузки сети.

В этой классической схеме моделирование транспортных потоков включает в себя четыре подзадачи или стадии. Это разделение условно, так как подзадачи взаимосвязаны и могут решаться общим алгоритмом или итеративно. В расчетах используются усредненные характеристики задержек.

Методы расчета корреспонденций. Матрица корреспонденций – количественная характеристика движения автомобилей по сети. Модели расчета корреспонденций можно разделить на:

- Гравитационная модель.

При построении модели предполагается баланс прибытия-отправления между двумя районами. Основная идея заключается в том, что корреспонденция из одного района в другой пропорциональна общему объему отправления-прибытия и некоторой функции, зависящей от дальности поездки центрами.

Основной недостаток – объем корреспонденций связан с характеристиками пары районов, взятых в отдельности от других районов.

- Энтропийная модель.

В ней исходят из вероятностного описания поведения автомобилей – реализуемое состояние системы имеет наибольший статистический вес, который отражает сравнительные вероятности реализации различных состояний в системе.

- Модель конкурирующих возможностей Стауффера.

В ней заложены предположения о том, что объем корреспонденций между двумя районами определяется количеством альтернативных центров на пути следования, т.е. количеством альтернативных возможностей посещения.

- Другие модели.

Модели семейства „конкурирующих центров “ учитывают большую или меньшую привлекательность района. Их рассматривают как обобщение гравитационной модели.

Дальнейшие обобщения приводят к учету структуры системы районов. Идет ранжирование районов по статусу.

Загрузка улично-дорожной сети (assignment). Основана на поиске равновесного распределения потоков. Входной информацией для модели служит матрица корреспонденций. На выходе модель выдает средние значения потоков на въездах в сеть и средние доли поворачивающих автомобилей на перекрестках.

Модель Traffic Assignment может быть рассмотрена как взаимодействие двух аспектов:

1. запрос (demand) – характеризуется принципами, принятыми для представления выбора маршрута пользователей сети;
2. предложение (supply) – представляет реакцию сети на этот выбор, т.е. реакция сети.

Возможны следующие классификации:

1. По гипотезам о причинах распределения потоков:

- нормативный подход;
Распределение корреспонденций осуществляется на основе глобального критерия эффективности работы транспортной сети.
- дескриптивный подход;
Структура потоков формируется на основе индивидуальных решений участников движения.

2. По учету временного фактора:

- статическая модель загрузки;
- динамическая модель загрузки.

3. По критерию выбора маршрутов:

- системное равновесие (system-equilibrium assignment);
- пользовательское равновесие (user-equilibrium assignment).

Наиболее простой способ распределения корреспонденций по сети – наложение каждой корреспонденции на оптимальный (кратчайший) маршрут, соединяющий два района. Более развитые модели вычисляют самые короткие маршруты и рассеивают корреспонденцию по этим маршрутам. Однако эти методики, не учитывают важных факторов, влияющих на выбор маршрутов движения:

- Выбор маршрута некоторыми пользователями увеличивает загрузку элементов сети, входящих в данный маршрут. Это приводит к увеличению времени проезда и влияет на оценку и выбор маршрутов другими водителями. Т.е. одних участников движения влияет на выбор других.

П р и м е ч а н и е:

Наиболее эффективной моделью, в полной мере учитывающей фактор взаимного влияния пользователей, является модель поиска равновесного распределения (user-equilibrium assignment).

Построение статических моделей этого типа к настоящему времени завершено, найден критерий интегральный критерий оптимизации, который является чисто математическим, поэтому не имеет содержательной интерпретации в терминах принятия решений или транспортной терминологии. Основным источником по этому типу моделей может служить книга Y. Sheffi, Urban Transportation Networks: User Equilibrium Analysis and Mathematical Algorithms, MIT, 1985.

- Особенностью движения по маршрутам общественного транспорта заключается в том, что пользователь может принимать решение не о конкретном маршруте, а о стратегии поведения. Модель, определяющая загрузку транспортной сети на основе расчета стратегий поведения, называется моделью оптимальных стратегий.

Микромодели предназначены для анализа задержек и пропускной способности пересечений и сегментов транспортной сети.

Задержки определяются на основе моделирования движения потока по элементу сети имеющего детальное описание геометрии, режима регулирования и других особенностей. Распределение потоков по сети является входом.

Возможна классификация по методам оценки:

- Оценочные формулы (усредненный подход);
- Моделирование динамики движения.

Методы моделирования динамики потока сходны с методами, приведенными в разделе 0.3.1:

- Микромоделли (имитационное моделирование);
- Макромодели (моделирование динамики усредненных характеристик потока – „гидродинамические модели“);
- Ячеечные автоматы.

0.3.3 Современные теории транспортного хаоса

Теории Хаоса Движения[9]. Некоторые ученые сравнивают транспортный поток с жидкостью, в котором волны пульсируют словно тормозящие или ускоряющиеся автомобили.

Другие пытаются объяснять эти процессы в терминах теории хаоса. Они предполагают, что в определенные моменты, когда трасса становится переполненной, поток автомобилей становится настолько неустойчивым (нестабильным), что главная причина задержки движения может являться результатом чего-то столь же незначительного (второстепенного), подобно тому как для тормозящего водителя доля секунды, кажется, тянется как несколько минут.

Первый подход уподобляет внезапное замедление движения потока сменам стадии его движения по аналогии с явлениями природы, например, превращением пара в воду или воды в лед.

При слабой загруженности водители движутся по дороге как им удобно. Когда дорога становится загруженной, водители неожиданно оказываются в потоке. Они уже могут двигаться только на общей с потоком скорости и вынуждены ехать только по своей полосе. Эта промежуточная стадия, называемая „синхронизированным“ потоком, более всего схожа с жидкостью.

Когда движение потока, проходя через эту вторую стадию, сменяется режимом „stop-and-go“. Здесь автомобили уже становятся подобными кусочкам льда.

На основе этой гипотезы ученые национального исследовательского центра Лос-Аламоса выделили следующие **паттерны транспортных потоков:**

Стадия 1. Пока дорога не загружена, автомобилисты движутся на удобной им скорости, свободно переходя на соседние полосы движения. На этой стадии автомобили сопоставимы с потоком частиц, имеющих большую свободу в своем перемещении.

Стадия 2. Как только дорога становится переполненной, автомобилисты внезапно теряют большую часть свободы перемещения и вынуждены двигаться уже как часть всеобщего транспортного потока, согласовывая с ним свою скорость. При этом они уже не имеют возможности свободно менять полосу движения. Эта стадия, подобная потоку воды, называется „синхронизированным“ потоком.

Стадия 3. При очень большом числе автомобилей в потоке движение приобретает прерывистый характер (т. н. режим „stop-and-go“). На этой стадии транспортный поток можно уподобить потоку замерзающей воды, автомобили становятся на какой-то промежуток времени как бы „приклеенными“ к одному месту дороги.

Несмотря на то, что автомобиль можно уподобить молекулам жидкости, все же он не совсем похож на обычную молекулу. Люди приспосабливаются к маршрутам, основываясь на вчерашних или сегодняшних прогнозах движения. Кроме того, у молекул происходят столкновения друг с другом. Для водителей такое поведение нецелесообразно. Не смотря на то, что физики часто распространяют поведение молекул жидкости на транспортный поток следуя традиционному для своей области подходу, в транспортных системах неизбежно присутствует человеческий фактор. По этому поводу Chris L. Barrett, ученый, который убедил Лос-Аламос,

что изучение транспортных потоков является серьезным вопросом национальной безопасности и теперь возглавляет этот проект, говорит[9]: *”Транспортный поток – это поток частиц, имеющих собственные мотивы движения. Я думаю, что это чертовски интересно!”*.

0.3.4 Обзор программных комплексов моделирования

Макро моделирование (классическая 4-х стадийная задача)

В числе программных продуктов имеются следующие пакеты:

- TransCad
- EMME/2
- Tmodel2
- UfosNet
- MINUTP
- Quick Response System II (узкоспециализированный пакет)
- Trip Generation (узкоспециализированный пакет)

В настоящее время неизвестно о применении имитационных программ отечественного производства для решения локальных задач.

Для решения глобальных (градостроительных) задач применяются следующие разработки:

- Программа Transnet, разработанная в институте системного анализа РАН, Москва;
- Программное обеспечение, разработанное НИИПИ Территориального развития и транспортной инфраструктуры, Санкт-Петербург;
- ПКМ МАДИ, Москва;
- Программный комплекс по технико-экономическим обоснованиям решений на федеральной сети автомобильных дорог ГипродорНИИ, Москва;
- Автоматизированная методика расчета пассажиропотоков в генпланах городов и КТС, ЦНИИП Градостроительства, Москва.

Отечественные программные продукты не доведены до ”товарного” вида, не рекламируются и не используются без участия их разработчиков. ПКМ Санкт-Петербурга создавалось исключительно для использования в своем регионе. Программный комплекс ГипродорНИИ создавался для расчетов по сети федеральных и региональных автодорог с использованием упрощенных методик и алгоритмов. Программный комплекс ЦНИИП Градостроительства создан недавно, и оценить его пригодность для использования в объемах московского региона пока не возможно.

Микро моделирование

В национальном исследовательском центре Лос-Аламос разрабатывается модель TRANSIMS. Она не является коммерческим продуктом.

Пакет TRANSIMS. TRANSIMS (TRansportation ANalysis and SIMulation System) – часть программы по усовершенствованию модели многополосного автотранспортного движения, выполняемой национальным исследовательским центром Лос-Аламос и оплачиваемой американским Министерством транспорта и Управлением по охране окружающей среды.

Рисунок 1 иллюстрирует архитектуру TRANSIMS. TRANSIMS моделирует каждую транспортную единицу и оценивает ее движение на протяжении ее движения по назначенному маршруту. Т. о. TRANSIMS предсказывает поведение каждого участника транспортного потока.

Модуль "Спрос на движение" (модуль 1 на рис. 1) генерирует индивидуальные транспортные средства и их движение посредством создания моделей поселений, данные о которых взяты из переписи населения или других источников. При этом модуль генерирует движение каждого транспортного средства.

Межмодульный "Планировщик маршрута движения" (модуль 2 на рис. 1) использует определенные на основе демографических и других данных стоимостные показатели движения индивидуально для каждого потребителя транспортного спроса. Он представляет данные оптимальности выбранного способа движения для каждого транспортного средства, сделанные при составлении плана маршрута.

Блок "Микромоделирование движения" (модуль 3 на рис. 1) воспроизводит поездки по транспортной сети для прогноза характеристик отдельных транспортных средств и транспортной системы в целом. Он пытается воспроизвести маршрут каждого транспортного средства в масштабе городского региона. Так, например, каждое пассажирское транспортное средство имеет водителя, который реализует собственную логику движения согласно своего маршрута, ускоряя или замедляя движение транспортного средства.

Блок "Микромоделирования движения" вырабатывает информацию для модуля "Качество воздуха" (модуль 4 на рис. 1) для оценки экологических показателей. Модель эмиссии оценивает экологические параметры как для транспортных средств находящихся в движении так и ожидающих движения.

Важно отметить, что все эти модули работают в разных масштабах времени, но всегда привязаны к движению каждого транспортного средства.

Кроме указанных на рисунке 1 связей модули имеют также различные обратные связи. Так незапланированные поездки, естественно отражаются на недельной активности. Те поездки, которые в процессе микромоделирования окажутся длиннее, чем это оказалось на самом деле, потребуют корректировки (калибровки модели). То есть, модель необходимо постоянно подстраивать под реальную транспортную обстановку.

Обзор использования пакетов в мировой практике моделирования

По материалам, имеющимся в мировой сети Internet, анализ статистики использования наиболее распространенных программных продуктов в мировой практике инженерных транспортных расчетов по состоянию на 2000 год (*обзор пакетов для имитационного моделирования (локальные задачи) и прикладных задач без макромоделирования по 4-х стадийной прогнозной модели*) позволяют сделать следующие выводы:

- Synchro является наиболее часто используемым пакетом для задач оптимизации светофорного регулирования.
- HCS является наиболее часто используемым пакетом для анализа характеристик пересечений.
- SimTraffic используется для имитационного моделирования движения чаще, чем все другие пакеты, включая CORSIM, вместе взятые.



Рисунок 1. Архитектура TRANSIMS.

Рассмотрение столичной транспортной системы, как большой динамической системы позволяет нам выделить динамику в разных временных масштабах. Развитие города, происходящее в течение ряда лет - левая часть рисунка - в настоящее время не является частью проекта TRANSIMS. TRANSIMS в настоящее время преимущественно связан с более короткой временной динамикой. Это допускает определенное использование земли, транспортной инфраструктуры и позволяет оценивать спрос на движение на ежедневные и еженедельные сроки. Эта оценка спроса на движение затем распределяется с учетом выбора режима и цены отдельной перевозки.

Так например, перевозка топлива и школьников имеет разные ограничения на способ перевозки. После того, как совершен выбор маршрута, закончен, осуществляется микромоделирование динамики поездки с посекундной динамикой. В качестве важной стороны эффекта городского транспортного движения, каждый автомобиль является передвижным источником загрязнения окружающей среды. Это загрязнение может быть вычислено и оценено результирующее влияние на качество атмосферного воздуха.

Качество программного обеспечения. Показатель вычислен на основе оценок респондентов от 0 (пакет невозможно использовать) до 5 (высокое удобство использования).

Пакет	Показатель	Количество респондентов
SimTraffic	3,5	34
HCS	3,9	61
HCM	3,8	39
CORSIM	3,6	27
TRANSYT	3,6	40
TEAPAC	3,3	20
Passer-2	3,2	33
Passer-3	2,9	29
Passer-4	1,9	8

Производительность. Оценочное количество часов, требуемое для анализа 4 пересечений, включая время создания отчета и коррекции ошибок.

Пакет	Время (час)	Количество респондентов
Synchro	2,9	47
SimTraffic	3,5	22
HCS	3,6	64
TRANSYT	7,5	30
CORSIM	9,5	20

0.3.5 Выводы

1. Существует три основных подхода к построению математических моделей, заключаются в следующем: либо на исходном наборе гипотез сразу строится законченная аналитическая модель (характерно для макромоделей), либо используется модель с дополнительным использованием закодированных алгоритмов поведения (имитационная модель), либо программная реализация модели (характерно для микромоделей на основе ячеечных автоматов) регулярно калибруется, так как пока не построено моделей, предсказывающих поведение водителя за рулем либо самообучающихся моделей.
2. Непереносимость зарубежных моделей без существенной переделки заключена в двух основных причинах:
 - различается организация движения: за рубежом организован приоритет общественному транспорту, поворот направо на красный свет и т.п.;
 - крайняя недисциплинированность отечественных водителей (*это основная причина*).
3. Современные требования к моделям таковы, что модель необходимо "сажать" на ГИС-модель УДС с базой данных по параметрам УДС.
4. Существует два семейства программных моделирующих комплексов для моделирования транспорта:
 - для решения задач макроmodellирования (прогноз корреспонденций и потоков, реализация общепринятой 4-х стадийной модели расчетов). Основой расчетов служит алгоритм поиска равновесного распределения потоков (user-equilibrium assignment).

- для решения задач микромоделирования (анализ параметров движения, задержек и пропускных способностей на локальных участках сети). Эти задачи решаются в основном с применением имитационного моделирования.
5. Имеются теоретические трудности для совместного использования и обмена данными между глобальными и локальными моделями. *Корень трудностей* лежит в характере предположений, закладываемых в модели равновесного распределения потоков, не вполне совместимых с имитационным моделированием.
- Вследствие этих теоретических трудностей не существует пакетов, в полном виде реализующих программное взаимодействие локальных и глобальных моделей, хотя оба типа моделей нужны для решения задач дорожно-транспортного комплекса.*
6. В настоящее время предлагаемые на рынке программные продукты не содержат реализации наиболее продвинутых теоретических моделей в обоих классах:
- Для глобальных задач используется только статический вариант равновесного распределения.
 - Для имитационного моделирования в практически используемых пакетах пока не используются ячеечные автоматы, а также новые динамические макромоделли типа гидродинамических.

0.3.6 Перспективные задачи

- **Моделирование динамики заторов** – для Москвы движение потока происходит на стадиях "синхронного движения" с частыми переходами к режиму "stop-and-go", причем, пробки "растекаются" по сети за счет того, что подъезжающие к затору водители разворачиваются на объездные дороги, на которых в свою очередь возникают новые заторы. Т. о. необходимо моделировать процессы образования и рассасывания пробок по сети.
 - **Внезапный переход от режима свободного движения к неустойчивому режиму "stop-and-go"**[9]: "Hani S. Mahmassani, профессор университета Штата Техас и, наверное, ведущий американский эксперт в теории движения автомобильных потоков, говорит: "Причина внезапного перехода от режима свободного движения к режиму "stop-and-go" остается одной из тайн нашего времени".
- Примечание:* основываясь на следующем[9]: "В Дьюисберге (Германия) физик Майкл Шреккенберг (Michael Schreckenberg) получивший прозвище "Профессор Пробок" и 15 его коллег проводили эксперименты, преднамеренно создавая заторы. В результате они пришли к выводу, что переход от свободного потока к синхронизированному может случаться почти спонтанно – намного быстрее, чем это предполагалось раньше. Часто, это случается около наклонных въездов на автомагистраль, когда происходит **внезапное (взрывное) увеличение числа автомобилей на дороге**, что может превращать поток в "движущееся желе". Такое инертное состояние распространяется вверх и вниз по дороге, сохраняясь, возможно несколько часов, даже после того как наклонный въезд опустеет" **можно предположить, что переход от режима свободного движения к неустойчивому, а затем и к затору может протекать как режим с обострением.**
- Опыт создания программы TRANSIMS говорит в пользу использования *междисциплинарных подходов*, в связи с необходимостью моделирования поведения водителя за рулем. *Желательно, чтобы модель была обучаемая*, так как TRANSIMS требует еженедельной

калибровки – это можно сделать с помощью модели на основе *нейронных сетей*. А предположение специалистов из Лос-Аламоса о *самоорганизации* в транспортном потоке⁶ говорит в пользу применения методов *нелинейной динамики*.

- Для решения задач среднесрочного и долгосрочного прогноза (подробнее в разделе 0.1.4) с учетом развития УДС, городской застройки и организации дорожного движения можно исследовать задачу прогноза с использованием *закономерностей эволюции транспортных сетей*, разработанных С. А. Тарховым из Института географии РАН.
- *Моделирование матрицы корреспонденций с учетом флуктуаций и случайных факторов*.⁷
- Микромодель транспортной *динамики в узлах сети* и их влияние на *распределение потоков в сети*.
- *Влияние ДТП и других случайных факторов на распределение потоков в сети*.

⁶Эта гипотеза подтверждается специалистами ЦИТИ.

⁷Эта и две следующие задачи поставлены специалистами ЦИТИ.

Литература

- [1] Р. Шеннон, Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: "Мир", 1978, 418 с.
- [2] Х. Иносэ, Т. Хамада, Управление дорожным движением. М.: Транспорт, 1983.
- [3] Клинковштейн Г.И., Афанасьев М.Б. Организация дорожного движения: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1977. – 231 с.
- [4] Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков. – М.: Мир, 1966. – 286 с.
- [5] Traffic and Related Self-Driven Many-Particle Systems, Dirk Helbing
- [6] Отчет о проведении Международного семинара "РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ОРГАНИЗАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ В ЦЕНТРЕ МОСКВЫ"(г. Москва, 20-21 февраля 2002 г.)
- [7] Постановление Правительства Москвы "О мерах по совершенствованию организации дорожного движения в городе Москве" от 5 декабря 2000 г. N 971.
- [8] Постановление Правительства Москвы "Об основных направлениях совершенствования организации дорожного движения в г. Москве" от 15 мая 2001 г. N 459-ПП.
- [9] STUDYING THE EBB AND FLOW OF STOP-AND-GO; LOS ALAMOS LAB USING COLD WAR TOOLS TO SCRUTINIZE TRAFFIC PATTERNS ALAN SIPRESS WASHINGTON POST STAFF WRITER, Thursday, August 5, 1999, Last updated 1/31/00
- [10] Network Traffic as a Self-Organized Critical Phenomena, Kai NAGEL, Steen RASMUSSEN, and Christopher L. BARRETT, TSA-DO/SA MS-M997 and CNLS MS-B258, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 87545, USA, Santa Fe Institute, 1399 Hyde Park Road, Santa Fe, New Mexico, 87501, USA, April 1, 1996
- [11] Моделирование транспортных систем. Брайловский Н.О., Грановский Б.И., М.: „Транспорт“, 1978, 125 с.
- [12] Бусленко В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. М.: Наука, 1977.
- [13] Н. П. Бусленко. О математическом описании элементов сложных систем // Докл. АН СССР, – 1969. – т. 187, N 6. –с 1221–1222.