

УДК 625

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М.М. Бекмагамбетов, д.т.н., проф. / А.В. Кочетков, д.т.н., проф.

ВВЕДЕНИЕ

Транспортные проблемы являются комплексными, которые распространяются в различные области регулирования и управления. Поэтому измерения, наблюдения и моделирование отдельно взятых процессов в транспортном секторе и всей совокупности демографических и социально-экономических отношений важны для разработки стратегии развития инфраструктуры мегаполисов [1-5].

Современный опыт организации жизненного пространства крупных городов предлагает достаточно большой спектр действий по разрешению транспортных проблем. К ним относятся: совершенствование технико-эксплуатационных показателей отдельных элементов улично-дорожной сети (УДС), систем управления дорожным движением и отдельных систем транспорта; строительство многоярусных паркингов при одновременной ликвидации неорганизованных автостоянок на проезжей части УДС; сокращение зон тяготения за счет ограничения и/или запрещения строительства новых объектов производственной, финансово-деловой, торгово-обслуживающей и культурно-развлекательной направленности на территориях со сложившейся застройкой и ограниченными возможностями транспортной инфраструктуры; вывод на городскую периферию и/или за пределы города крупных предприятий и организаций; создание препятствий для использования УДС в перегруженных транзитными потоками районах города путем введения особых режимов движения (запрет остановок и стоянок, пешеходное движение и т.п.); введение различного рода ограничений на въезд в центральную часть города (запрет на проезд индивидуальных автомобилей, в том числе введение системы «чет-нечет», разрешение на проезд по типу транспортных средств, организация платного проезда и т.п.) [6].

Деятельность по каждому из этих направлений не только затратна, но и сопряжена с необходимостью решения сложных вопросов социального и хозяйственного плана. Поэтому исключение субъективизма при-

нимаемых управленческих решений в ранжировании задач и выборе приоритетов играет важную роль в деятельности любой городской администрации. При этом для городских властей не менее важно уметь правильно и объективно оценивать и планировать инвестиционную деятельность.

Транспортное моделирование и является одним из инструментов для эффективного решения задач в данной области. Для разгрузки какого-либо транспортного узла обычно предварительно проводят инженерные расчеты, которые основаны на полуэмпирических закономерностях распределения потоков по элементам УДС. При этом требуется определить, какое количество транспортных средств будет двигаться по каждому из возможных направлений в случае изменения тех или иных параметров транспортного узла (а в более широком смысле — изменения отдельных элементов или даже части УДС). Но проблема заключается в том, что не существует механизмов для получения объективных ответов на вопросы: будут ли совершаться те или иные передвижения, и каковыми могут быть их объемы [7-10].

Транспортный спрос постоянно подстраивается под управляющие воздействия. В качестве подтверждения этого факта можно привести несколько хорошо известных жизненных примеров их поведения: если в связи с флуктуациями потока, обусловленными случайными факторами, на той или иной магистрали возникают заторы, то в последующем спрос на передвижение по этой магистрали снижается; эффект снижения нагрузки, достигнутый за счет модернизации элемента УДС, через некоторое время сводится на нет за счет роста спроса (нахождения водителями более свободного для движения пути именно по этому элементу УДС); если где-то временно выходит из строя светофор, то каким бы напряженным не было движение в данном узле, аварии будут случаться не чаще, а в некоторых случаях даже реже, чем в обычной ситуации, и т.п.

Вместе с тем, современное общество нуждается в постоянном увеличении объемов транспортного обслуживания, повышении надежности, безопасности и качества перевозок людей и грузов. Эти требования влекут за собой увеличение затрат на совершенствование транспортной инфраструктуры, превращение ее в высокоуправляемую логистическую систему. Однако инвестиционные риски развития транспортных сетей значительно возрастают, если не учитываются закономерности загрузки отдельных их элементов в зависимости от социально-экономических, демографических, технико-эксплуатационных, природно-климатических и иных условий. Практика показывает, что игнорирование таких закономерностей приводит к перегрузке или, наоборот, недогрузке отдельных участков сети, образованию транспортных заторов и зон транспортной недоступности, повышению уровня аварийности и возрастанию отрицательного воздействия на окружающую среду со стороны автотранспорта. В крупных городах для поиска эффективных стратегий управления транспортными потоками, нахождения оптимальных решений при проектировании улично-дорожной сети, инженерных сооружений на ней и организации дорожного движения приходится учитывать очень широкий спектр характеристик транспортных потоков, определяемых как внутренними, так и внешними факторами.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Теория транспортных потоков, как наука, получила свое развитие на стыке различных областей знаний — физики, математики, экономики, исследований операционных систем, перевозочных процессов и т.п. К настоящему моменту накоплен обширный практический опыт описания транспортных систем и поведения участников движения. Однако общий уровень исследований и их практическое использование — всё еще остаются ограниченными ввиду: нестабильности и многообразия форм транспортных потоков; трудности получения всеобъемлющей и объективной информации о потоках, которая является наиболее сложным и ресурсоемким элементом системы управления; противоречивости критериев качества управления дорожным движением, когда, с одной стороны, необходимо обеспечивать бесперебойность и высокую скорость сообщений, а с другой — сокращать ущерб, наносимый транспортной системой, в том числе за счет ограничения скоростей, направлений движения и т.п.; неточности исполнения решений по управлению дорожным движением, что обусловлено большим количеством участников движения с индивидуальными характеристиками и стилем поведения; непредсказуемости дорожных условий из-за внешних (например, погодных-климатических условий) и внутренних факторов [8-10].

Следствием трудности формализации транспортных потоков является определенный дисбаланс между результатами научных исследований и математическими расчетами, с одной стороны, и практически наблюдаемыми результатами — с другой. Отсюда наличие различных подходов к математическому моделированию и достаточно большое количество программных продуктов, моделирующих транспортные потоки.

Задачи транспортного моделирования:

В масштабе городской агломерации, как правило, требуется решение задач и получение ответов на следующие вопросы:

- как изменится функционирование городской транспортной системы при изменении внешних транспортных связей, например, при строительстве объездной дороги и выводе транзитных потоков за пределы городской территории или при выносе крупных объектов тяготения за городскую черту;
- как изменится работа транспортной системы при введении в эксплуатацию новых элементов УДС (развязки, дополнительные транспортные связи и т.п.) или транспортных систем (линий метро, LRT и т.п.);
- каких изменений в транспортной системе города может потребовать строительство нового жилого района или расположение емкого центра тяготения при сохранении транспортных условий на сети;
- какого перераспределения потоков транспорта и пассажиров следует ожидать в случае временного закрытия или ликвидации какого-либо элемента транспортной системы;
- каким образом отразится на работе транспортной системы введение различного рода ограничений на передвижение по городской территории (платный проезд по магистрали, за въезд в тот или иной район, введение зонального тарифа на общественном транспорте и т.п.);
- какой эффект может дать развитие автоматизированных систем управления дорожным движением и др.

На локальном уровне требуется решение задач, отвечающих на следующие вопросы:

- какой эффект даст та или иная модернизация элемента УДС (перепланировка узла или группы узлов, расширение проезжей части улицы и т.п.);
- как изменение в организации движения может повлиять на пропускную способность узла или группы узлов (ограничение направлений движения, оптимизация светофорного цикла, изменение условий пересадки пассажиров и т.п.).

Работа всех элементов городской транспортной системы — дорожного и путевого хозяйства, различных видов транспорта, энергообеспечения, регулирования и

контроля — тесно взаимосвязана. С учетом этой связанности на практике может возникнуть потребность анализа работы отдельных элементов транспортной системы, а именно: УДС; пассажирского транспорта общего пользования; грузовых перевозок; АСУ ДД и т.д.

Современные достижения транспортного моделирования позволяют получать удовлетворительные результаты на субрегиональном, региональном, государственном и межгосударственном уровнях. В связи с этим к задачам транспортного моделирования могут быть добавлены результаты исследований эффективности работы контрольно-пропускных пунктов на государственных границах; мультимодальных перевозок и т.п.

Важнейшая цель транспортного моделирования — составление объективных прогнозов транспортной ситуации в зависимости от внешних (социально-экономических, демографических, природно-климатических) и внутренних (развитие сетей, транспортных систем, подвижного состава и т.п.) изменений, анализ и подготовка рекомендаций для инвестиционных проектов в области инфраструктуры. Транспортная ситуация может моделироваться на любой расчетный срок — от оперативных задач сегодняшнего дня до долгосрочной (на 20–30 лет) перспективы развития города, городской агломерации или более крупного региона. Условно задачи прогнозирования можно разделить на: долгосрочные (с перспективой более 5 лет); среднесрочные (с перспективой до 5 лет); краткосрочные (анализ последствий намечаемых мероприятий после непосредственной их реализации и стабилизации транспортных потоков, обычно в сроки до 6 мес.); оперативные (в реальном масштабе времени).

Способы решения перечисленных задач (кроме оперативных) принципиально одинаковы. Разница заключается в информационных (исходных) данных и степени их достоверности.

Основы математического моделирования закономерностей дорожного движения были заложены в 1912 г. российским ученым, профессором Г.Д. Дубелиром. Развитие математического аппарата начиналось с изучения и обоснования пропускной способности транспортных магистралей и их пересечений.

Сейчас пропускная способность дороги или узла (перекрестка) является важнейшим критерием, характеризующим функционирование путей сообщения. Под пропускной способностью понимают максимально возможное число транспортных средств, которое может пройти через сечение дороги в единицу времени. В специальной литературе встречаются также различные модификации этого понятия: теоретическая, номинальная, эффективная, собственная, практическая, фактическая и другие виды пропускной способности.

Первая попытка обобщить математические исследования транспортных потоков и представить их в виде

самостоятельного раздела прикладной математики была сделана Ф. Хейтом. В середине прошлого столетия интерес к исследованию транспортных систем и их функционированию значительно усилился. Эта заинтересованность была вызвана быстрыми темпами автомобилизации населения и проявилась, в частности, в финансировании многочисленных проектов, обращении к авторитетным университетским специалистам в области математики, физики, процессов управления. Среди наиболее известных из них — нобелевский лауреат И. Пригожин, специалист по автоматическому управлению М. Атанс, автор фундаментальных работ по статистике Л. Брейман.

В настоящее время существует значительное количество литературных источников и Интернет-ресурсов, посвященных изучению автотранспортных потоков, включая многочисленные теоретические исследования по их математическому моделированию. Необходимо упомянуть такие академические издания, посвященные динамике движения автомобилей и автомобильных потоков, как *Transportation Research*, *Transportation Science*, *Mathematical Computer Simulation*, *Operation Research*, *Automatica*, *Physical Review E*, *Physical Reports* и др. Регулярно публикуются новые не только отчеты, статьи и всесторонние обзоры, но и учебники. К сожалению, речь идет преимущественно о развитых странах, где транспортные проблемы уже не одно десятилетие оказывают самое непосредственное влияние на жизнь людей.

В конце прошлого столетия в США исследования транспортных систем были возведены в ранг проблем национальной безопасности. К решению задач в этой области были привлечены лучшие «физические умы» и компьютерная техника Национальной исследовательской лаборатории (Los Alamos National Lab — один из крупнейших центров ядерных исследований США).

В моделировании дорожного движения исторически сложились два основных подхода — детерминистический и вероятностный (стохастический). В основе детерминированных моделей лежит функциональная зависимость между отдельными показателями, например скоростью и дистанцией между автомобилями в потоке. В стохастических моделях транспортный поток рассматривается как вероятностный процесс.

Все модели транспортных потоков можно разбить на два класса: модели-аналоги и модели следования за лидером. В моделях-аналогах движение транспортных средств уподобляется какому-либо физическому потоку (гидро- и аэродинамические модели). Этот класс моделей принято называть **макроскопическими**. В моделях следования за лидером существенно предположение о наличии связи между перемещением ведущего и ведомого автомобиля. По мере развития теории в моделях данной группы учитывалось время реакции водителей, исследовалось движение на многополосных дорогах,

изучалась устойчивость движения и т.п. Этот класс моделей называют **микроскопическими**.

Макроскопические или *прогнозные* модели позволяют симулировать процессы передвижения населения и грузов по городу с выбором путей следования и видов используемого транспорта. Они предназначены для оценок транспортных потоков при изменении транспортной сети, транспортных систем, а также потокообразующих и потокопоглощающих объектов города. В связи с этим основная область их применения — поддержка управленческих решений в области планирования развития городских территорий, анализ последствий изменений в организации движения, выбор альтернативных проектов развития транспортной инфраструктуры и т.п.

Микроскопические или *имитационные* модели ориентированы на адекватное описание поведения участников транспортного процесса и правильность воспроизведения параметров и характеристик движения. Имитационные модели позволяют оценивать скорость движения, задержки на перекрестках, длину и динамику образования транспортных заторов и т.п. В связи с этим основная область их применения — оценка инженерных решений локальных инфраструктурных проектов, улучшение и/или оптимизация транспортных потоков в отдельных узлах или группе узлов, подбор светофорных циклов и т.п.

С точки зрения математического аппарата транспортные модели делятся на:

1. **Детерминированные**, в основе которых лежит гипотеза о том, что состояние транспортного потока в прошлом и будущем определяется его настоящим положением. При этом исследуются функциональные зависимости между отдельными показателями, например скоростью и дистанцией между автомобилями, в предположении, к примеру, что все автомобили равноудалены друг от друга.

2. **Стохастические**, в основе которых лежит гипотеза о том, что состояние транспортного потока зависит от случайного сочетания ряда параметров (факторов), положенных в основу модели. При этом 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 движения и т.п. Эти закономерности носят существенно стохастический характер, что и определяет выбор математического аппарата теории вероятностей.

3. **Модели-аналоги**, основанные на гипотезе поведения транспортных потоков, соответствуют например, дей-

ствию сжимаемой жидкости. Транспортный поток в этом случае рассматривается как поток одномерной сжимаемой жидкости при допуске, что такой поток подчинен законам сохранения и существует взаимно однозначная зависимость между его скоростью и плотностью. При этом используется различный математический аппарат — от простейших уравнений Навье–Стокса, кинематических волн, ударных волн до уравнений внезапного перехода, подобного конденсации, или замерзанию воды.

4. **Статические**, в основе которых лежит гипотеза об усреднении всех параметров потоков за определенный интервал времени.

5. **Динамические**, работающие в реальном режиме времени.

Наибольшее распространение получили два способа привязки транспортной модели к УДС. Во-первых, это так называемые граф-модели, когда на электронной географической подоснове (карте УДС) строится граф/орграф, вершины которого отображают узлы УДС, соединенные ребрами. При этом определяются правила обхода графа или, иными словами, организация дорожного движения. Во-вторых, это ГИС-модели, когда на электронной карте УДС, разделенной на однородные элементарные участки: узлы, прямолинейные или криволинейные связи и участки их сопряжения, каждому элементу сети задается соответствующее математическое описание. Матрица корреспонденций является количественной характеристикой передвижения по сети, определяющей взаимодействие между i -й и j -й зонами посредством k -го вида транспорта. Существуют различные модели для расчета корреспонденций.

Гравитационная модель. При построении данной модели предполагается баланс прибытия — отправления между двумя зонами. Основная идея заключается в том, что корреспонденция из одной зоны в другую пропорциональна общему объему отправок-прибытий и некоторой функции, зависящей от дальности поездки между центрами этих зон. Математически, аналогично второму закону Ньютона, это выражается следующим образом:

$$G_{ij} = \mu \frac{S_i \cdot P_j}{C_{ij}^2}$$

где G_{ij} — поток некоторой величины из зоны i в зону j ; S_i — объем производства данной величины в зоне i ; P_j — объем потребления данной величины в зоне j ; C_{ij} — затраты на передвижение из зоны i в зону j ; μ — коэффициент приведения.

Основной недостаток гравитационной модели заключается в том, что объем корреспонденций в ней связан

с числом характеристик пары зон, взятых в отдельности.

Энтропийная модель. В данной модели 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 данной модели заложены предположения о том, что объем корреспонденций между двумя зонами определяется числом альтернативных центров на пути следования, т.е. числом альтернативных возможностей посещения.

Другие модели. Модели семейства «конкурирующих центров» учитывают большую или меньшую привлекательность зоны. Их рассматривают как обобщение гравитационной модели. Дальнейшие обобщения приводят к учету структуры системы зон. Зоны ранжируются по статусу. Загрузка улично-дорожной сети основана на поиске равновесного распределения потоков. Входной информацией для модели служит матрица корреспонденций. На выходе модель выдает средние значения потоков на элементах сети и средние доли поворотов на перекрестках.

Модель Traffic Assignment может быть рассмотрена как взаимодействие двух аспектов: запрос (demand), который характеризуется принципами, принятыми для представления выбора маршрута пользователей сети; предложение (supply), которое представляет реакцию сети на этот выбор. Здесь также возможны различные подходы к математическому описанию процессов: по гипотезам о причинах распределения потоков, которые, в свою очередь, могут использовать нормативный подход (распределение корреспонденций осуществляется на основе глобального критерия эффективности работы транспортной сети) или дескриптивный подход (структура потоков формируется на основе индивидуальных решений участников движения); по учету временного фактора со статической или динамической моделями загрузки; по критерию выбора маршрутов с учетом системного равновесия (system-equilibrium assignment) или пользовательского равновесия (user-equilibrium assignment).

Наиболее простой способ распределения корреспонденций по сети — наложение каждой корреспонденции на оптимальный (кратчайший) маршрут, соединяющий две зоны. Более усовершенствованные модели вычисляют самые короткие маршруты и рассеивают по ним корреспонденцию. При этом приходится учитывать ряд важных факторов, в частности, выбор маршрута некоторыми пользователями увеличивает загрузку элементов сети, входящих в маршруты этих пользователей. Это приводит к увеличению времени поездки и влияет на оценку и выбор маршрутов другими пользователями,

т.е. выбор одних участников движения влияет на выбор других.

Наиболее эффективной моделью, в полной мере учитывающей фактор взаимного влияния пользователей, является алгоритм поиска равновесного распределения потоков (user-equilibrium assignment). Построение статических моделей этого типа к настоящему времени завершено, найден интегральный критерий оптимизации, который является чисто математическим, поэтому не имеет содержательной интерпретации в терминах принятия решений или транспортной терминологии [7].

Следует также иметь в виду особенность движения по маршрутам общественного транспорта, которая заключается в том, что пользователь может принимать решение не о конкретном маршруте, а о стратегии поведения на сети. Модель, определяющая загрузку транспортной сети на основе расчета стратегий поведения пользователей, называется моделью оптимальных стратегий.

В качестве примера распространения и использования программных продуктов для транспортного моделирования приводится перечень программного обеспечения, рекомендованный к использованию Федеральной администрацией скоростных автомагистралей США (US Department of Transportation, FHWA) [8].

Инструменты для эскизного планирования: Better Decisions, HDM (Highway Design and Management), IDAS (ITS Deployment Analysis System): IMPACTS, iroBENCOST, uickZone, CRITS (Screening for ITS), Sketch Methods, SMITE, SPASM (Sketch-Planning Analysis Spreadsheet Model), STEAM (Surface Transportation Efficiency Analysis Model), TEAPAC/SITE, TrafikPlan, TransDec, Trip Generation, Turbo Architecture.

Инструменты для моделирования спроса на передвижение: b-Node Model, CUBE/MINUTP, CUBE/TP+/Viper, CUBE/TRANPLAN (Transportation Planning), CUBE/TRIPS (Transport Improvement Planning System), EMME/2™, IDAS, MicroTRIMS, QRS II (Quick Response System II), SATURN (Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Network), Tmodel, TransCAD®, TRANSIMS (Transportation Analysis Simulation System), VISUM.

Аналитические/детерминистические инструменты (HCM методология): 5-Leg Signalized Intersection Capacity, aaSIDRA, ARCADY (Assessment of Roundabout Capacity and Delay), ARTPLAN (Arterial Planning), CATS (Computer-Aided Transportation Software), CCG (Canadian Capacity Guide)/Calc2: CINCH, CIRCAP (Circle Capacity), DELAYE (Delay Enhanced), dQUEUE-TOLLSIM, FAZWEAVE, FREEPLAN (Freeway Planning): FREWAY (Freeway Delay Calculation Program), FRIOP, General-Purpose Queuing Model, Generalized Annual Average Daily Service Volume Tables, Generalized Peak-Hour Directional Service Volume Tables, GradeDec 2000: HCM/Cinema©, HCS (Highway Capacity Software) 2000, HiCAP™ (Highway Capacity

Analysis Package), HIGHPLAN (Highway Planning), Highway Safety Analysis, ICU, IQPAC (Integrated Queue Analysis Package), Left-Turn Signal/Phase Warrant Program, NCAP (Intersection Capacity Analysis Package), PICADY (Priority Intersection Capacity and Delay), PROGO, Quality/Level of Service Handbook, RoadRunner, SIG/Cinema©, SIPA, SPANWIRE, SPARKS (Smart Parking Analysis), Synchro, TEAPAC/NOSTOP, TEAPAC/SIGNAL2000, TEAPAC/WARRANTS, TGAP (Traffic Gap Analysis Program), TIMACS, Traffic Engineer's Toolbox, Traffic Noise Model, TRAFFIX™, TSDWIN™, TS/PP-Draft, WEST, WHICH, WinWarrants.

Инструменты для оптимизации транспортных потоков: PASSER™ II-02, PASSER III-98, PASSER IV-96, PROGO, SOAP84, Synchro, TEAPAC/NOSTOP, TEAPAC/SIGNAL2000, TEAPAC/WARRANTS, TRANSYT-7F, TSDWIN, TS/PP-Draft.

Макроскопические симуляционные модели: BTS (Bottleneck Traffic Simulator), FREQ12, KRONOS, METACOR/METANET, NETCELL, PASSER II-02, PASSER III-98, PASSER IV-96, SATURN, TRAF-CORFLO (Corridor Flow), TRANSYT-7F, VISTA.

Мезоскопические симуляционные модели: CONTRAM (Continuous Traffic Assignment Model), DYNAMIT-P, DYNAMIT-X, DYNASMART-P, DYNASMART-X, MesoTS.

Микроскопические симуляционные модели: AIMSUN2 (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks), ANATOLL, AUTOBAHN, CASIMIR, CORSIM/TSIS (Traffic Software Integrated System), DRACULA, FLEXYT-II, HIPERTRANS (High-Performance Transport), HUTSIM (Helsinki University of Technology Simulator), INTEGRATION, MELROSE, MicroSim, MICSTRAN, MITSIM (Microscopic Traffic Simulator), MIXIC, NEMIS, PADSIM, PARAMICS, PHAROS, PLANSIM-T, ROADSIM (Rural Road Simulator), SHIVA, SIGSIM, SIMDAC, SIMNET, SimTraffic, SISTM (Simulation of Strategies for Traffic on Motorways), SITRA B+, SITRAS, SmartPATH, TEXAS (Texas Model for Intersection Traffic), TRANSIMS, TRARR, TWOPAS, VISSIM, WATSim©.

Интегрированные инструменты для анализа транспортных потоков: AAPEX (Arterial Analysis Package Executive), ITRAF, PROGO, UNITES.

Классические транспортные модели на макроуровне представляют собой решение четырех уровневой задачи. Их структура в самом общем виде представлена на рис. 1.

Для решения глобальных градостроительных задач имеются российские разработки: программа Transnet (Институт системного анализа РАН, Москва); программное обеспечение, разработанное НИПИ 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).



Рисунок 1. Архитектура классической четырехступенчатой транспортной модели

К сожалению, российские программные продукты не доведены до «товарного» вида, не рекламируются и не используются без участия их разработчиков. Они создавались исключительно под конкретных пользователей и для решения конкретных задач. Используемый в них математический аппарат базируется на упрощенных методиках и алгоритмах, а эмпирические данные получены, как правило, по результатам исследований, выполненных в эпоху строительства социализма, и не отвечают современным реалиям.

Согласно обзору Интернет-ресурсов к числу достаточно апробированных в развитых странах мира программных продуктов, предназначенных для транспортного моделирования на макроуровне, относятся следующие пакеты: TransCad® (Caliper Corp., USA); EMME/2™ (Montreal University); TRIPS (MVA UK); CUBE (<http://www.citilabs.com>); SATURN (Leeds University, UK, только для транспортных потоков); VISSUM (компонент пакета PTV Vision, PTV AG, Karlsruhe, Germany).

На рынке имитационных пакетов представлен достаточно широкий спектр инструментов, предназначенных для моделирования транспортных потоков на микроуровне. Среди них, например, можно отметить широко применяемые в европейских странах пакеты: AIMSUN2; DRACULA; Paramics; SISTM; VISSIM.

AIMSUN2 (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks) представляет собой программное обеспечение, способное воспроизводить реальные условия движения в городской сети, которые могут содержать и скоростные автомагистрали. Пакет основан на микроскопическом подходе моделирования. Поведение каждого отдельного транспортного средства в сети постоянно корректируется во времени согласно некоторым моделям поведения водителя (ведомый автомобиль, смена полосы и т.п.). AIMSUN2 сочетает дискретно-непрерывный подход к моделированию: в нем есть ряд элементов транспортных систем (транспортные средства, детекторы), состояние которых



Рисунок 2. Типичный интерфейс программы AIMSUN2

постоянно изменяется в течение периода моделирования, а есть и другие элементы (светофоры, входы), состояния которых меняются дискретно в заданные моменты моделирования. Пакет очень подробно моделирует потоки в сети: различаются отдельные виды транспортных средств и их водители, решается широкий спектр сетевой геометрии, учитываются типовые инциденты и т.д. AIMSUN2 интегрирован в имитационную среду GETRAM (обобщенная среда для анализа и моделирования транспортных потоков), которая состоит из графического редактора сети, базы данных сети, статической модели задач, временных моделей и модуля для хранения и представления результатов. На рис. 2 представлен интерфейс программы AIMSUN2.

DRACULA (Dynamic Route Assignment Combining User Learning and Micro-simulation). Данный пакет микроэкономического моделирования задуман и разработан в Институте транспортных исследований (Университет г. Лидса, Великобритания). Он является составной частью пакета программ SATURN, разработанных при поддержке консалтинговой компании WS Atkins consultants. Развитие и апробация данной модели осуществлялись за счет крупных грантов Совета по научно-техническим и физическим исследованиям Великобритании, а также при поддержке DRIVE II Telematics programme Европейского союза. Данная модель находится в развитии и уже в ближайшем будущем будет включать изучение затрат на поездки с учетом автомобильных заторов в режиме реального времени, динамического маршрутного ориентирования, внедрения обособленных полос движения для общественного транспорта, процедуры эвакуации в случае чрезвычайных ситуаций (например, химических аварий, наводнений), а также стратегическое (междугородное) моделирование. В настоящее время DRACULA позволяет моделировать последствия политики спроса и предложения в сети маршрутов, но имеются планы расширить этот диапазон возможностей для заполнения более высоких уровней выбора, касающихся способов передвижения и локализации мест проживания и мест работы.

DRACULA рекомендуется как супермодель, поскольку этот пакет включает в себя широкий круг возможностей для допущений и степени детализации, позволяющих делать выбор в зависимости от целей исследования.

Например, выбор маршрута может быть смоделирован на уровне индивидуального водителя или на суммарном уровне; односекундный интервал микромоделирования может быть использован для движения по избранному пути или могут быть использованы макроскопические модели движения; выбор маршрута может рассматриваться как выбор водителей или он может быть зафиксирован, возможен выбор времени поездки по маршруту в ответ на неожиданные ситуации, детализируется выбор полосы движения во избежание попадания в полосу с большим затором. Выбор конкретного набора параметров супермодели вызывает конкретную модель из пакета DRACULA. С точки зрения моделирования специальных условий, таких как несчастные случаи, бедствия или погодные условия, которые негативно отражаются на пропускной способности дорог, пакет DRACULA идеален. Он предоставляет возможность моделировать реакцию водителей на информацию в пути (когда, например, наблюдается затор или по радио предоставляется соответствующая информация), принимая во внимание то, как они используют свой практический опыт (сохраненный в их личном файле истории) по преодолению чрезвычайных ситуаций. С точки зрения транспортных потоков посекундное микромоделирование с использованием смены полос движения и моделей выбора дистанций является единственной техникой реализации серьезных моделей для следующих действий: рассасывания очередей (в отличие от вертикального формирования очереди, типичного для макроскопических и мезоскопических подходов); воздействия на характер поведения водителей (например, выбор интервала движения на нерегулируемом перекрестке, смены полосы движения в ответ на несчастный случай); динамического распространения заторов в системе вверх по потоку (так называемый эффект ударной волны).

PARAMICS (PARAllel MICROscopic Simulation, Quandstone Ltd., United Kingdom) — набор программных инструментов для моделирования трафика на микроуровне. Данный пакет широко используется в Великобритании и США. Он предназначен для моделирования транспортных узлов в городах (перекрестки, регулируемые правилами приоритета и светофорами, транспортные развязки и т.д.), перегруженных автострад, а также для моделирования оптимизации работы общественного транспорта, съездов с автомагистралей, регулирования маршрутов общественного транспорта, светофоров и т.п.

PARAMICS является легко переносимым и расширяемым пакетом, который позволяет реализовать подходы к моделированию потоков на транспортной сети любого размера, начиная с простого перекрестка и заканчивая национальной транспортной сетью. Основными ограничениями на размер сети являются объем памяти и мощность компьютера. Пакет поддерживает возмож-



Рисунок 3. Пользовательский интерфейс программы PARAMICS

ность индивидуального перемещения порядка 200 тыс. автомобилей в единицу времени. Задано семь классов транспортных средств, однако пользователь может создать свое собственное транспортное средство. Выбор маршрута автомобилем определяется заданной таблицей стоимостей. У каждого транспортного средства есть заданный интервал времени (в среднем 1 с), через который переопределяется его положение в сети и его поведение. Смена полосы на дороге выполняется с учетом интервала времени и предыдущей «истории» автомобиля. В пакете реализован алгоритм, который задает движение автомобиля по заданной траектории маршрута. Движение регулируется физическими атрибутами автомобиля и его текущей скоростью. Поддерживается возможность определения маршрута согласно матрице корреспонденций. В PARAMICS реализованы возможности сбора статистики и формирования всесторонних отчетов об анализе транспортной сети. Предусмотрены 2D/3D визуализация, создание презентаций и видеороликов. На рис. 3 показан пользовательский интерфейс программы PARAMICS.

SISTM (Simulation of Strategies for Traffic on Motorways) — программный пакет, предназначенный для изучения дорожного движения в стесненных условиях с целью разработки и оценки различных стратегий, направленных на уменьшение заторов. Его разработка начата в 1988 г. SISTM может оценивать: различные расположения автомагистралей (включая их пересечения); переменные системы ограничения скорости; пандусы измерительных систем; измененные характеристики транспортных средств; изменение поведения водителей. Продукт разработан в Великобритании (Highways Agency) и доступен для всех лиц, нуждающихся в моделировании автомобильных дорог. Это микроскопическая имитация автомагистрали с автомобилями, которые следуют алгоритму с использованием измененного уравнения Гиппса. Поведение каждого водителя описывается двумя параметрами — агрессивностью и пониманием. Эти параметры используются для получения желаемого распределения скоростей и косвенно желаемых интервалов между транспортными средствами. Используемый временной интервал в модели составляет 5-8 сек. Смена полосы контролируется специальным параметром с указанием пользователем желания такой смены. Когда осуществляется маневр смены полосы, водителю допускается принимать временно «небезопасное» продвижение вперед. Это позволяет сглаживать



Рисунок 4. Интерфейс программы VISSIM

эффект в тех случаях, когда водитель двигается по выбранной полосе.

VISSIM — многоцелевой пакет для моделирования транспортных потоков на микроуровне. Он широко используется в Европе, США и других странах. Пакет предназначен для анализа, реинжиниринга и оптимизации городских и междугородных транспортных сообщений. Программное обеспечение позволяет моделировать городские перекрестки любой сложности и типа регулирования, анализировать пропускную способность транспортных систем и тестировать схемы транзитных приоритетов. Пакет позволяет управлять системами контроля альтернативных маршрутов и контроля трафика, анализировать емкость стоянок и моделировать потоки различных транспортных средств с пересечениями, пересадками на разных уровнях (автобусный маршрут, железная дорога, метро, эскалатор и т.д.). Реализована возможность подключения матриц корреспонденций пакетов VISUM и Emme/2. Реализован интерфейс с такими пакетами, как TEAPACK и SYNCHRO. В VISSIM реализована модель Видерманна, которая описывает поведение водителя за рулем. В ней учитываются психофизические возможности человека: снижение внимания и времени реакции; время, необходимое для принятия решения в условиях окружающей среды.

VISSIM предоставляет возможности сбора статистики на любом участке транспортной сети и формирования отчетов, создания презентаций и видеороликов.

На рис. 4 показан интерфейс программы VISSIM.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для сравнения пакетов между собой выделим значимые для анализа транспортной ситуации критерии. Если ввести индексы для объектов и явлений моделирования как: погодные условия (1); обследования для парковочных пространств (2); припаркованные автомобили (3); конкретизация моделей двигателей (4); коммерческие автомобили (5); велосипеды и мотоциклы (6); пешеходы (7); дорожно-транспортные происшествия (8); общественный транспорт (9); меры по стабилизации потоков (10); рассасывание заторов (11); переплетение потоков (12); непрямолинейность (12), то возможности программного обеспечения по их учету будут отмечены в табл. 1 символом X.

Если ввести индикаторы, обозначающие цели моделирования, согласно табл. 2, то возможности программ-

Таблица 1. Возможности описания объектов и явлений

Программа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
AIMSUN2	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	X	X	X
CORSIM	-	X	X	-	X	-	X	X	X	-	X	X	X
DRACULA	X	-	-	-	X	-	-	X	X	-	X	X	X
FLEXSYT II	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X
PARAMICS	X	X	-	-	X	-	-	X	X	X	X	X	X
SISTM	X	-	-	-	X	-	-	X	-	-	X	X	-
VISSIM	-	-	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X

ного обеспечения по учету этих целей будут представлены аналогичным образом в табл. 3.

Если ввести индикаторы, обозначающие другие возможности моделирования, такие как: предоставление значимых параметров по умолчанию (1); ключевые параметры могут определяться пользователем (2); ограниченная потребность в получении и накоплении данных (3); простая интеграция с другими моделями (4); простая

Таблица 2. Цели микромоделирования

Цель	Индикатор	Цель	Индикатор
Эффективность	E1: модальное разделение	Безопасность	S1: интервалы движения
	E2: время на перемещение		S2: обгон
	E3: изменение времени перемещения		S3: время инцидента
	E4: скорость		S4: число аварий
	E5: заторы		S5: скорость/последствия инцидента
	E6: регулярность общественного транспорт		S6: взаимодействие с пешеходами
	E7: длина очереди		Удобства
Окружающая среда	V1: выбросы вредных веществ	F2: стресс	
	V2: уровень придорожного загрязнения	Технические особенности	
	V3: уровень шума		T2: эксплуатационные затраты

Таблица 3. Целевые возможности моделей

Программа	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	V1	V2	V3	F1	F2	T1	T2	
AIMSUN2	X	X	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-	
CORSIM	-	X	X	X	X	-	X	-	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-	
DRACULA	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-	
FLEXSYT II	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-	X	-	
PARAMICS	-	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	X	-	X	-	-	X	-	
SISTM	-	X	X	X	X	-	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
VISSIM	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	X	X	-	-	-	-	X	-

Таблица 4. Другие возможности микромоделей

Программа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AIMSUN2	X	X	-	X	X	-	PC, UNIX	-	X	X
CORSIM	X	X	X	X	-	FHWA	PC	-	-	X
DRACULA	X	X	X	X	-	-	PC	F 20	-	X
FLEXSYT II	X	X	-	X	-	-	PC	F 10	X	X
PARAMICS	X	X	-	X	-	-	UNIX	F 2	X	X
SISTM	X	X	-	-	-	-	PC	F 5	-	X
VISSIM	X	X	X	-	X	GMT	PC, UNIX	real-time	X	X

Информация по данным FHWA (Federal Highway Administration USA — Федеральная администрация скоростных автомагистралей США); GMT (German Ministry of Transport — Министерство транспорта ФРГ).

интеграция с другими базами данных и ГИС-системами (5); одобрение местными/национальными транспортными организациями (6); возможность запуска на дешевых аппаратных средствах (например, PC, а не UNIX) (7); типичная скорость расчетов (F — быстро, S — медленно; число показывает, насколько расчет быстрее реального времени моделирования) (8); графический построитель сети (9); графическая анимация результатов моделирования (10), то возможности программного обеспечения будут охарактеризованы следующим образом (табл. 4).

Если ввести индексы для параметров транспортной телематики: координация светофорного регулирования (1); адаптация светофорных сигналов (2); приоритет общественного транспорта (3); измерительные рампы (4); контроль транспортных потоков (5); управление дорожными инцидентами (6); доступный зональный контроль (7); региональная транспортная информация (8); статическое управление маршрутами (9); динамическое управление маршрутами (10); управление парковками (11); информация об общественном транспорте (12);

Таблица 5. Транспортные телематические функции микромоделей

Программа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
AIMSUN2	X	X	-	X	-	X	X	-	X	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	X
DRACULA	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	X
FLEXSYT II	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-	X
PARAMICS	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	-	X	X	-	X	-	-	X	X
SISTM	-	-	-	X	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
VISSIM	X	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	X	X	X

автоматическое прибытие и убытие с площадей (13); оценки скопления (14); адаптивная система автоматического регулирования скорости (15); автоматизированная система скоростных автомагистралей (16); автономные транспортные средства (17); поддержка пешеходов и велосипедистов (18); обследование транспортных средств (19); детекторы транспортных средств (20), то телематические возможности программного обеспечения будут представлены следующим образом (табл. 5).

ВЫВОДЫ

Существуют два основных подхода к построению математических моделей для транспортных потоков, заключающиеся в следующем: либо на исходном наборе гипотез сразу строится законченная аналитическая модель (характерно для макромоделей), либо используется модель с дополнительным использованием закодированных алгоритмов поведения (имитационные модели для микроуровня).

Модели, используемые в развитых странах мира, требуют осторожного применения, по крайней мере, по двум причинам: во-первых, имеется специфика в организации движения, например, за рубежом общественному транспорту предоставляется определенный приоритет движения, разрешен правый поворот на красный свет светофора и т.п.; во-вторых, поведение отечественных водителей на дороге не отличается высокой дисциплинированностью.

Современные требования к моделям таковы, что их необходимо интегрировать с ГИС-моделями и базами данных по параметрам УДС.

Существуют два семейства программных продуктов для моделирования транспортных процессов: для решения задач на макроуровне (прогноз корреспонденций и потоков, реализованный на общепринятой четырехстадийной модели расчетов); в основе расчетов лежит алгоритм поиска равновесного распределения потоков (user-equilibrium assignment); для решения задач на микроуровне (анализ параметров движения, задержек и пропускных способностей на локальных участках сети). Эти задачи решаются в основном с применением имитационного моделирования.

Имеются теоретические трудности для совместного использования и обмена данных между глобальными и локальными моделями, обусловленные характером предположений, закладываемых в модели равновес-

ного распределения потоков, которые трудно совместимы с имитационным моделированием. Вследствие этих теоретических трудностей не существует пакетов, в полном виде реализующих программное взаимодействие локальных и глобальных моделей, хотя оба типа моделей необходимы для решения задач дорожно-транспортного комплекса.

В настоящее время предлагаемые на рынке программные продукты не содержат реализации наиболее продвинутых теоретических изысканий в обоих классах: для задач глобального характера используется преимущественно статический вариант равновесного распределения; для имитационного моделирования практически не привлекаются так называемые ячеечные автоматы, а также новые динамические макромоделей наподобие гидродинамических.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Отчет о проведении Международного семинара «Решение проблем организации автомобильного движения в центре Москвы» (г. Москва, 20-21 февраля 2002 г.).
2. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков. — М.: Мир, 1966.
3. Nagel K. Particle hopping models and traffic flow theory, Los Alamos National Laboratory (Received 12 September 1995).
4. Lighthill M.J., Whitham F.R.S. On kinetic waves. A theory of traffic flow on crowded roads // Proc. of the Royal Society Ser. A. 1995, Vol. 229, No. 1178.
5. Nagel K., Wagner R., Woesler R. Still flowing: Approaches to traffic flow and traffic jam modeling, January 2, 2003.
6. 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
7. Y. Sheffi, Urban Transportation Networks: User Equilibrium Analysis and Mathematical Algorithms, MTI, 1985
8. http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat_vol2/sectapp_e.htm#top
9. СНиП РК 3.01-01-2002 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений.
10. Лобанов Е.М. и др. Пропускная способность автомобильных дорог. — М.: Транспорт, 1970.