

ОБЗОР МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА МАКРО- И МИКРОУРОВНЯХ

Н.В. Каплун, А.В. Матюшин, Н.С. Мирза, А.В. Скворцов

Томский государственный университет

E-mail: nadya@indorsoft.ru, anton@indorsoft.ru, mirza@indorsoft.ru, skv@indorsoft.ru

В статье изложены задачи моделирования транспортных потоков на микро- и макроуровнях. Рассмотрены существующие модели транспортной сети, используемые для решения этих задач, проведен их подробный анализ, выявлены достоинства и недостатки.

Современное общество характеризуется постоянным ростом потребностей в перевозках пассажиров и грузов, это влечет за собой возрастание нагрузки на транспортные сети городов и регионов. При этом развитие любого города или региона в Российской Федерации регламентируется соответствующими генеральными планами развития, разрабатываемыми на перспективный срок порядка 20 лет. Генеральные планы состоят из двух важнейших составных частей: схемы территориального зонирования и транспортной схемы. При разработке транспортной схемы проектировщики выполняют оценки *корреспонденций* (потребностей в перемещении пассажиров и грузов) между различными транспортными районами города (для генплана города) или между населёнными пунктами (для генплана региона). После того как корреспонденции оценены, они переносятся на запроектированный вариант транспортной сети, и для каждого участка дороги от перекрестка до перекрестка оценивается *интенсивность движения* – количество автомобилей, которое будет проезжать в обе стороны за 1 ч. Весь процесс оценки интенсивности движения называется *моделированием транспортных потоков*.

В соответствии с принятыми в Российской Федерации СНиП оценки интенсивности выполняются согласно «Руководству по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах» [1]. По сути, в нём рекомендуется брать обобщённые нормативные характеристики типичного населённого пункта и, исходя из этого, оценивать количество передвижений на автомобиле с разными целями. При этом практически игнорируется реальная структура транспортной сети, а транспортный поток представляет собой стационарное явление, обладающее средней скоростью, плотностью и интенсивностью движения. Такой подход называется макро моделированием или моделированием на макроуровне. Главным его достоинством является возможность оценки транспортных потоков в масштабах всего города или региона. Модели, полученные в результате этого подхода, называются макрокопическими моделями.

Принципиально другим подходом к оценке интенсивности движения является микро моделирование (моделирование на микроуровне), когда учитывается каждый отдельный автомобиль, движение которого моделируется во времени с учетом средств регулирования движения и других автомобилей. Применение микро моделирования предполагает рассмотрение отдельно взятого автомобиля как объекта, обладающего индивидуальным набором характеристик, учитывающих психологию водителя, конструктивные особенности автомобиля и т.д. За основу этого подхода взято предположение о наличии функциональной зависимости между отдельными характеристиками потока, такими, как скорость и дистанция между соседними автомобилями в потоке. В рамках этого подхода используются две модели транспортных потоков: модель следования за лидером и статистическая модель [2]. Эти модели называются микрокопическими.

На сегодняшний день программная реализация такого подхода тратит слишком много процессорного времени и оперативной памяти из-за огромного числа реально моделируемых автомобилей. Поэтому такой подход практически неприменим для городов и регионов. С другой стороны, микро моделирование обладает высокой точностью получаемых оценок, позволяет достаточно точно оценивать такие важные параметры, как качество работы средств регулирования дорожного движения, расчет эффективности перестроения перекрестка и многое другое.

Задачи макро- и микро моделирования

Среди задач моделирования транспортных потоков можно выделить следующие основные задачи:

1. Оценка различных вариантов строительства.
2. Оценка проектных решений и расчет эффективности инвестиций.
3. Совершенствование организации и обеспечение безопасности движения [3].

Решение данных задач представляет интерес для конечного пользователя. При решении этих задач можно прийти к более мелким подзадачам, которые, в свою очередь, могут быть решены с помощью микро- или макро моделирования.

В рамках макро моделирования решаются следующие задачи: 1) Определение нагрузки на отдельные сегменты транспортной сети. 2) Расчет предполагаемого перераспределения потоков транспорта при изменении структуры транспортной сети. 3) Расчет влияния введения экономических санкций на использование различных сегментов транспортной сети (к примеру платный въезд в определенные зоны). 4) Расчет перераспределения потоков транспорта при добавлении новых сегментов в транспортную сеть.

Микро моделирование, в свою очередь, решает задачи: 1) Получения точной траектории движения, с учетом средств организации движения. 2) Направлений движения по полосам. 3) Возможности перестроения между полосами, наличия аварийных ситуаций и заторов [3]. 4) Моделирование движения транспортных средств по видам (легковые автомобили, грузовики, автобусы, троллейбусы, трамваи, мотоциклы, велосипеды). 5) Оценка эффективности перепланировки различных сегментов транспортной сети (перепланировка перекрестка, группы перекрестков, изменение ширины проезжей части, изменение режима светофорного регулирования).

Обзор существующих моделей транспортной сети

Большая часть авторов, посвятивших свои труды моделированию транспортных потоков, представляют дорожное движение как результат взаимодействия четырех основных составляющих: водителя, автомобиля, дороги, среды. Однако, рассматривая эти составляющие как единый комплекс, особое внимание уделяют моделированию поведения водителя и автомобиля, в то время как модель дороги не описывается отдельным элементом системы, хотя некоторые ее характеристики используются ими в расчетах.

Для оценки существующих моделей дороги введем некоторые критерии оценки. Для начала определим факторы, которые необходимо включить в модель для получения адекватной модели дороги:

1. Матрица корреспонденций (потребностей в перемещении пассажиров и грузов). Несомненно, матрица корреспонденций является одной из наиболее важных факторов для создания адекватной модели дороги. Важно отметить и тот факт, что эта характеристика является характеристикой именно транспортной сети, а не отдельного транспортного потока.

2. Количество полос на отдельных участках транспортной сети. Число полос на участке дороги влияет на пропускную способность на данном участке, кроме того, необходимо учитывать и ситуацию на пересечении дорог разным количеством полос, что является наиболее вероятным местом для возникновения аварийных ситуаций и заторов.

3. Регулирующие устройства (светофоры, светофорная сигнализация на регулируемых переездах). Регулирующие устройства являются важной характеристикой не только отдельных участков, но и транспортной сети в целом, так как нередко из-за неправильной регуляции именно группы перекрестков возникает сложная дорожная ситуация.

4. Дорожные правила и ограничения (ограничения скорости, переходы, остановки, парковки). Для моделирования транспортных потоков необходимо рассматривать не только транспортный поток в целом, но и выделять, по крайней мере, маршрутный транспорт, у которого можно считать начальную и конечную точку маршрута передвижением в матрице корреспонденций, а также необходимо учитывать срединные остановки данного транспортного средства. Кроме того, переходы необходимо учитывать как аналогичное светофорному регулированию правило.

5. Атмосферно-климатические условия для данного участка сети. В связи с тем, что при гололедице, дожде или тумане основной поток транспорта будет двигаться гораздо медленнее обычного, возникает необходимость учитывать это при создании модели транспортной сети.

6. Категория дороги. Чем ниже категория дороги, тем медленнее будет двигаться автомобиль. К примеру, невозможно получить достаточное ускорение на дороге с грунтовым покрытием.

7. Геометрическая составляющая дороги (продольный, поперечный профиль). На дорогах со сложной траекторией движения машина движется гораздо медленнее, водитель ведет себя осторожнее, а на прямых участках дороги, как правило, наоборот.

8. Человеческий фактор. Отношение потенциального водителя к тому или иному участку дороги. К примеру, водитель, имеющий представление о транспортной сети своего города вероятнее всего поедет более длинным путем, но избежит мест, где наиболее часто встречаются пробки на дороге.

Таким образом, мы выявили несколько основных характеристик транспортной сети, которые влияют на транспортный поток непосредственно и оказывают на него наибольшее воздействие. Только с учетом всех указанных факторов можно получить реальную оценку нагрузки на транспортную сеть и распределение транспортных потоков по сети. Рассмотрим модели транспортной сети, предлагаемые наиболее известными авторами.

Вероятностная модель дороги

Авторы книги «Моделирование движения автомобиля» [4] описывают моделирование движения одного автомобиля с помощью так называемой вероятностной модели дорожных условий. Рассмотрим данную модель как одну из возможных для использования при моделировании транспортных потоков.

В рамках этой модели выделяются следующие группы характеристик (дорожных условий), существенно влияющих на результирующие показатели движения автомобиля: 1) Общая характеристика сети дорог и местности (характер рельефа, тип грунтов, вид покрытия, географическое положение местности). 2) Атмосферно-климатические условия на рассматриваемой территории (среднемесячные температуры, количество осадков, испарения, влажность почвы и т.д.). 3) Показатели механической прочности покрытия и основания дороги. 4) Характеристики физического состояния поверхности по условиям сцепления с ней колес автомобиля. 5) Геометрическая и геоморфологическая характеристика дорог и местности (геометрические элементы продольного профиля и плана, типичные сосредоточенные препятствия и т.д.).

На основе этих характеристик устанавливаются их вероятностно-статистические законы распределения для данного участка, базируясь на которых авторы получают результирующие показатели движения в типичных на этом участке дорожных условиях.

Рассмотрим, каким образом авторы используют данную модель на примере моделирования движения автомобиля с использованием статистических характеристик продольного профиля и плана автомобильной дороги. Для начала вводятся конструктивные параметры автомобиля (полный вес, радиус качения колес, передаточные числа и КПД трансмиссии, фактор сопротивления воздуха и др.). Затем процесс собственно вычисления параметров движения автомобиля включает в себя два этапа: 1) Получение псевдослучайных чисел с заданными законами распределения, характеризующими дорожные условия, т.е. воспроизведение программным способом на компьютере геометрических элементов продольного профиля и плана автомобильной дороги. 2) Определение средних скоростей движения автомобиля, расхода топлива и других показателей движения на воспроизведенном участке дороги.

В результате, авторы по соответствующим формулам и таблицам получают такие характеристики, как средняя скорость движения автомобиля, расход топлива, интенсивность разгона, число включений и продолжительность работы отдельных передач, средний процент использования мощности двигателя и др. [4]. Отметим, что получение данных характеристик будет достаточно трудоемко и неэффективно для группы автомобилей и, тем более, для автомобилей в пределах города или региона. Кроме того, в данном случае авторы получают модель для исключительно статистического анализа, для генерации дорожных условий, что исключает анализ априорно-известных характеристик для таких задач, как, к примеру, расчет эффективности инвестиций при перестроении участков дороги.

Большое количество разнородных характеристик являются основным достоинством этой модели. Приведенные авторами характеристики, несомненно, являются достаточными для моделирования движения одного автомобиля, однако даже для задач микромоделирования использование таких характеристик для группы машин приведет к большим затратам оперативной памяти, не говоря уже о макромоделировании, где модель должна охватывать автомобили всего города или даже региона. Таким образом, модель является слишком детальной для решения практических задач.

Для задач микромоделирования в данной модели отсутствуют понятия перекрестков, полос для движения, направления движения и т.д. В модели отсутствует человеческий фактор, авторы полагаются только на статистику, в то время как реальное положение может меняться с течением времени (к примеру, в утреннее время суток и в вечернее, в так называемые часы пик, нагрузка на сеть будет больше, чем в среднее время суток). Проблемы в данном случае возникают в вопросе, как моделировать группы автомобилей. Таким образом, данная модель непригодна для решения поставленных авторами данной статьи задач.

Модель дороги, предложенная Х. Иносе и Т. Хамада

В книге Х. Иносе и Т. Хамада [5] описана модель транспортной сети специально для моделирования транспортных потоков. Авторы данной книги выделяют 2 метода хранения информации об автомобиле согласно организации этой информации при моделировании на ЭВМ.

В первом из них дорога разделяется на блоки достаточной длины и для каждого блока отводится участок памяти. Наличие автомобиля (скорость и направление) в данном блоке запоминается в участке памяти, соответствующем месту нахождения автомобиля, и движение автомобилей представляется передачей информации между участками памяти («физическая» или дорожно-ориентированная модель). Во втором методе для каждого автомобиля отводится участок памяти и индивидуальные характеристики автомобиля (место нахождения, скорость) хранятся в участках. Движение автомобилей представляется изменением содержимого участков памяти («математическая» или автомобильно-ориентированная модель).

Если используется физическая модель хранения информации об автомобиле, то дорога делится на участки протяженностью, равной средней длине автомобиля, и, если игнорируется распределение длин автомобилей, то каждый автомобиль представляется двоичной единицей. Если учитывается длина автомобилей, то

дорога разбивается на участки меньшей длины и каждый автомобиль представляется цепочкой единиц. Модель дороги представляется цепочкой из нулей и единиц (рис. 1).

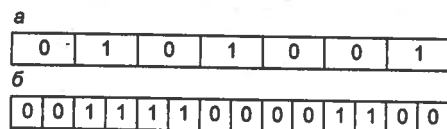


Рис. 1. Модель дороги для физической модели данных

С каждым участком или группой участков дороги связан набор следующих характеристик: 1. Число полос для движения. 2. Ограничение скорости. 3. Знаки, светофоры. 4. Расположение въездов и съездов. 5. Уклон, расстояние видимости. 6. Радиус кривой в плане. 7. Признак и расстояние до развязки, номер развязки. 8. Признак зоны с запрещением обгона.

Для математической модели автомобиль, попадающий на дорогу на въезде или начале дороги, получает идентификационный номер, после чего информация относительно места его нахождения, скорости и т.д. записывается в участок памяти, соответствующий данному номеру. Обгоны автомобилей могут представляться несколькими способами. Один из них состоит в использовании списочной структуры, в рамках которой вместе с информацией, относящейся к данному автомобилю, заполняются номера автомобилей, едущих впереди и сзади него. Другой способ заключается в подготовке перечня номеров автомобилей, представляющего порядок их следования.

Дорога представляет собой прямую, разбитую на участки фиксированной длины, в каждом из которых хранятся такие данные, как: 1. Максимальная скорость. 2. Кривая. 3. Расстояние видимости. 4. Уклон (ускорение). 5. Левая или Правая кривая. 6. Признак развязки, расстояние до развязки, номер развязки. 7. Зона с запрещением обгона.

Для данной модели дороги существуют 2 способа описания перекрестков. Для первого случая игнорируется двумерная составляющая перекрестка, т.е. не учитывается пересечение дорог. Перекресток представляется как два пересекающихся участка, по которым автомобили передвигаются аналогично модели дороги, описанной выше. При этом учитывается работа сигнализации, движение пешеходов и, особенно, поворотные направления движения. Для моделирования автомобилей, совершающих маневр поворота, подход к перекрестку должен рассматриваться как двумерная область, а не одномерная дуга. Несмотря на это, перекресток обычно рассматривают одномерным и специально снабжают его «карманом», который может накапливать один или два автомобиля. Во втором случае моделируется только последовательность прибытий и убытий, где длина очереди устанавливается путем подсчета накапливаемых автомобилей, а убытие представляется вычитанием единицы из содержимого счетчика очереди.

К достоинствам этой модели относится то, что модель учитывает большое число значимых для этой задачи характеристик (расположение съездов, видимость, уклон, радиус кривой в плане и т.д.). К недостаткам же можно отнести ее громоздкость. Для конкретного участка дороги необходимо хранить большой объем данных, что делает невозможным моделирование больших транспортных сетей. Кроме того, способ разбиения дороги является нерациональным: разбивая дорогу на участки, равные средней длине автомобиля, мы получаем большую погрешность при моделировании длиномерных транспортных средств, а разбивая на участки минимальной длины, мы приходим к необходимости частого перестроения разбиения дороги, по мере обновления данных о транспортных средствах.

Данная модель транспортной сети на сегодняшний день является лучшей из представленных. Она учитывает большое количество характеристик, что позволяет моделировать ситуацию, близкую к реальной. Однако отметим, что модель описана неявно. В ней отсутствуют понятия о конкретных структурах данных. Кроме того, описание модели сводится к перечислению характеристик и их взаимодействия с системой, при этом не говорится о том, что конкретно представляет из себя модель данных, является ли модель графом или цепью Маркова или иной структурой. Несомненно, для использования такой модели ее необходимо доработать и ввести математические структуры, что позволит моделировать транспортные потоки на ЭВМ.

Данная модель предложена авторами для микромоделирования транспортных потоков. Для макромоделирования Х. Иносе и Т. Хамада предлагают другую модель транспортной сети. Суть ее состоит в том, что несколько автомобилей рассматриваются как группа, а дорога делится на участки длиной несколько десятков метров каждая и транспортный поток представляется числом автомобилей на участке со средней скоростью. Таким образом, расстояние вдоль дороги дискретно с шагом, равным средней длине автомобиля (переменным шагом), а автомобили в пределах участка не различаются.

Для передвижения автомобилей по дороге вначале определяется средняя скорость на участке, а затем автомобили передвигаются от одного участка к другому.

Автомобили на регулируемом перекрестке отнесены к фиктивному участку, вплотную примыкающим к перекрестку. Из этих участков вперед по ходу движения передвигают количество автомобилей, пропорцио-

нальное длительности периода горения зеленого сигнала, правые или левые повороты определяются с помощью случайных чисел и с учетом движения по улице, пересекающей данную.

Подобная модель является довольно грубой для нерегулируемых перекрестков. Недостатком данной модели также является то, что в описании модели транспортной сети не представлено никаких математических конструкций. Также авторы данной статьи считают, что средняя скорость движения – характеристика больше транспортного потока, чем конкретного участка пути, что не соответствует действительности.

Модель транспортной сети, используемая в геоинформационных системах

Для большинства задач макро моделирования используется представление дорожной сети в виде связанного ориентированного графа, множество вершин X которого соответствуют узлам сети, а множество дуг W – участкам сети между узлами. Городская территория разбита на ряд транспортных микрорайонов, при этом отправление и прибытие потока для них отождествляются с выбранным для каждого центром. Каждой дуге графа сопоставляют средние затраты времени на передвижение, пропускную способность.

Достоинством такого подхода является простота и удобство в использовании. Такая модель используется многими геоинформационными системами. К примеру, в книге «Геоинформационные системы в дорожной отрасли» [3] дано описание подобной модели. Для начала описания такой модели представим задачи моделирования транспортных потоков как задачи сетевого анализа. Задачами сетевого анализа называется ряд задач, которые решаются на основе транспортных сетей в геоинформационных системах [4], такие, как: 1. Поиск кратчайшего по времени и расстоянию маршрута между двумя заданными узлами транспортной сети. 2. Поиск кратчайшего обхода заданного набора пунктов (задача коммивояжера). 3. Поиск ближайших пунктов обслуживания. 4. Расчет зон обслуживания (вся карта разбивается на непересекающиеся части, каждая из которых будет соответствовать одному пункту обслуживания, который является ближайшим для точек внутри части). 5. Расчет транспортной доступности. Для каждого населенного пункта необходимо определить минимальное время, за которое из него можно доехать до райцентра, либо указать, что проезда нет. 6. Расчет межрайонных связей. Задача предполагает, что территория города или района разбита на некоторые транспортные районы (группы кварталов в городе или отдельные поселения), между которыми нужно установить величину тяготения друг к другу и уровень транспортной обеспеченности районов в соответствии с некоторым видом передвижения, вызванного этим тяготением.

Последняя задача является задачей расчета транспортных потоков, которая предполагает, что транспортные связи между районами известны (каким-то образом вычислены или измерены), и требуется определить, по каким конкретным дорогам будут двигаться автомобили и пассажиры. На основе этого объема перевозок между транспортными районами определяется несколько кратчайших маршрутов, а также количество машин, которые направляются по конкретному участку дороги. Задачи макро моделирования в данном контексте требуют детальной модели транспортной сети для адекватного ее решения.

Итак, модель транспортной сети для решения задач сетевого анализа представляет собой связанный граф схемы транспортных коммуникаций, который состоит из двух основных типов объектов (узлов, дуг) и одного дополнительного (маршрутов) (рис. 2).

Узлы графа транспортных коммуникаций представляют собой объекты на местности, характеризующиеся координатами, дополнительно они могут характеризоваться запретом на выполнение поворотов или временем их выполнения. Дуги характеризуются временем движения, разрешенными направлениями движения, классом дороги или пропускной способностью и т.п.

В транспортной сети этой модели разрешено взаимное пересечение дуг. Это необходимо, например, чтобы показать пересечение дорог на разных уровнях.

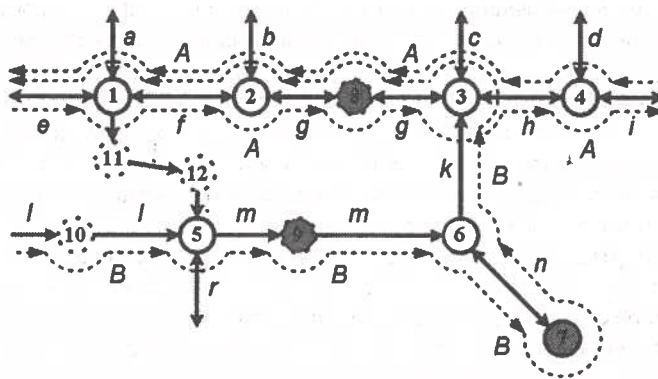


Рис. 2. Пример данных модели «транспортная сеть» (1–7 – узлы, 8–12 – промежуточные точки, 7–9 – остановки, А–В – маршруты общественного транспорта)

Данная модель информативна и функциональна, однако у нее есть большое количество недостатков: модель не учитывает геометрическую составляющую дороги, не обрабатывает отдельное взаимодействие с перекрестками, не учитывает человеческий фактор и другое. Модель является излишне укрупненной и не отвечает реальным требованиям к модели транспортной сети в современных условиях.

Заключение

Авторами в данной статье было предложено рассмотрение модели дороги как одной из составляющих комплекса автомобиль – водитель – дорога – среда. Многие работы о моделировании транспортных потоков вообще не рассматривают модель дороги как отдельную составляющую моделирования транспортных потоков, в то время как на сегодняшний день не существует моделей транспортной сети для моделирования транспортных потоков на макро- и микроуровнях, удовлетворяющих поставленным авторами критериям. Все известные модели обладают рядом существенных недостатков, нуждаются в качественной доработке и переработке. Это объясняет отсутствие на данный момент качественных программных продуктов, которые бы дали эффективное решение задач моделирования транспортных потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Руководство по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах / Отраслевой дорожный методический документ.*
2. *Семенов В.В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса [Электронный ресурс] – Математические методы в синергетике (<http://spkurdyumov.narod.ru/>)*
3. *Скворцов А.В., Поспелов В.И., Бойков В.Н., Крысин С.П. Геоинформационные системы в дорожной отрасли. – М.: Информавтодор, 2005. – 422 с.*
4. *Безбородова Г.Б., Галушко В.Г. Моделирование движения автомобиля. – Киев: Вища школа, 1978. – 168 с.*
5. *Иносэ Х., Хамада Т. Управление дорожным движением / Под ред. Н.Я. Блинкина: Пер. с англ. – М.: Транспорт, 1983. – 248 с.*

УДК 519.688

МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Н.В. Каплун, Н.С. Мирза

Томский государственный университет

E-mail: nadya@indorsoft.ru, mirza@indorsoft.ru

В статье изложены задачи моделирования транспортных потоков на микро- и макроуровнях. Предложена новая модель на основе сетей Петри. Рассмотрены процессы моделирования транспортных потоков с использованием предложенной модели, оценены основные ее достоинства и недостатки.

Современное общество характеризуется постоянным ростом потребностей в перевозках пассажиров и грузов, что влечет за собой увеличение нагрузки на транспортные сети городов и регионов. Развитие любого города в Российской Федерации регламентируется соответствующими генеральными планами развития, разрабатываемыми на перспективный срок порядка 20 лет. Генеральные планы состоят из схемы территориального зонирования и транспортной схемы. При разработке транспортной схемы проектировщики выполняют оценки корреспонденций (потребностей в перемещении пассажиров и грузов) между различными транспортными районами города (для генплана города) или между населёнными пунктами (для генплана региона). После того, как корреспонденции оценены, они переносятся на запроектированный вариант транспортной сети, и для каждого участка дороги от перекрестка до перекрестка оценивается интенсивность движения – количество автомобилей, которое будет проезжать в обе стороны за 1 ч. Весь процесс оценки интенсивности движения называется моделированием транспортных потоков.

На сегодняшний день оценка интенсивности выполняется согласно «Руководству по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах» [1]. По сути, в этом документе рекомендуется брать обобщённые нормативные характеристики типичного населённого пункта и, исходя из этого, оценивать количество передвижений на автомобиле. При этом практически игнорируется реальная структура транспортной сети, а транспортный поток представляет собой стационарное явление, обладающее рядом характеристик.