

**ОБЗОР СПОСОБОВ ПРИМЕНЕНИЯ МАТРИЦ ТРАНСПОРТНЫХ  
КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УЛИЧНО-  
ДОРОЖНОЙ СЕТИ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ  
В РЕЗУЛЬТАТЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ И  
ПАССАЖИРСКИХ ПОТОКОВ**

**AN OVERVIEW OF APPLICATION THE VARIOUS TYPES  
OF ORIGIN-DESTINATION MATRIX FOR DESIGNING THE ROAD  
NETWORK USING DATA OBTAINED FROM TRAFFIC FLOW**

*Яблоновская М.Ю.*, аспирант кафедры «Организация и безопасность движения»; *Боровской А.Е.*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация и безопасность движения»  
(Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова)

*Yablonovskaya M.Yu.*, Graduate Student of «Traffic Organization and Safety»; *Borovskoy A.E.*, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of «Traffic Organization and Safety» (BSTU named after V.G. Shoukhov)

**Аннотация.** *В настоящее время многие города столкнулись с серьезными транспортными проблемами, связанными с несоответствием состояния улично-дорожной сети тем нагрузкам, которые она испытывает. Для выработки решения данной проблемы применяют методы математического моделирования. Математические модели позволяют имитировать существующую дорожную ситуацию, а также прогнозировать возможные варианты её развития в зависимости от различных факторов. С целью описания свойств математических моделей, применяемых для изучения транспортных потоков, предложена классификация моделей и обозначены их особенности. Это позволит в процессе обработки данных осуществить выбор математической модели, удовлетворяющей требованиям и задачам, которые ставят перед собой исследователи.*

**Abstract.** *Currently, many cities are faced with serious traffic problems associated with the mismatch between state of road network and its load. To find a solution of this problem, the methods of mathematical modeling are used. Mathematical models allow us to simulate the existing traffic situation, as well as to predict the possible options for its development, depending on various factors. In order to describe the properties of mathematical models, which used to study the traffic flow, the classification of models was proposed and their features are marked. This allows during the processing of data to select such mathematical model that satisfies the requirements and targets that researchers set for themselves.*

## Введение

Методы математического моделирования широко применяются в различных отраслях наук. Одним из основных инструментов для создания транспортных моделей являются матрицы корреспонденций. Изначально матрицы корреспонденций использовали при исследовании пассажирских перевозок (ОДМ «Руководство по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах», 2003). Впоследствии появились возможности использования матриц с несколько иной точки зрения – для моделирования движения транспортных потоков. Этой теме посвящены работы современных исследователей. Авторами данной статьи предложено новое направление использования матриц корреспонденций в математическом моделировании транспортных потоков, а именно применение матриц при прогнозе необходимого количества парковочных мест у объектов притяжения населения. Однако предварительно необходимо подробно рассмотреть виды математических моделей применительно к исследованиям транспортных потоков.

На сегодняшний день транспортная инфраструктура является одной из наиболее важных составляющих, обеспечивающих жизнь городов и регионов. В связи с высокими темпами роста градостроительства во многих крупных населенных пунктах уже исчерпаны или близки к исчерпанию возможности дальнейшего развития улично-дорожной сети. Таким образом, с каждым годом всё острее становится необходимость улучшения схем организации движения, оптимального планирования транспортных сетей и совершенствования системы маршрутов общественного транспорта.

Для решения данных проблем требуются значительные финансовые затраты на проведение работ по оптимизации транспортной сети и её последующей трансформации в высокоуправляемую логистическую систему. При инвестировании необходимо учитывать закономерности развития транспортной сети, так как их игнорирование впоследствии становится причиной образования транспортных заторов, перегруженности или, наоборот, недостаточной загруженности отдельных линий и узлов сети, а также повышения уровня аварийности и экологического ущерба.

В процессе поиска эффективных стратегий управления транспортными потоками в городе и создания современных проектных решений необходимо учитывать влияние внешних и внутренних факторов на динамические характеристики смешанного транспортного потока. Транспортный поток, в свою очередь, представляет собой техносциальную систему, обладая при этом свойствами нестационарности, стохастичности и неполной управляемости. Эти признаки позволяют говорить о транспортном потоке как о системе, сложной для формализации. Многие характеристики транспортного потока невозможно измерить, также не представляется возмож-

ным провести масштабные натурные испытания. Поэтому для исследования изменений, влияющих на характеристики транспортных потоков, и оценки качества управления движением используют математическое моделирование транспортных сетей. Это позволяет имитировать и изучить все состояния транспортного потока в течение короткого времени и без существенных затрат.

Транспортный поток складывается из отдельных передвижений, которые совершают участники движения. Количество совершаемых передвижений определяется следующими факторами:

- 1) размещением объектов притяжения – мест проживания, мест приложения труда, мест культурно-бытового обслуживания и др.;
- 2) количеством и качеством улиц и дорог, параметрами организации движения, маршрутами общественного транспорта;
- 3) мобильностью населения и предпочтениями при выборе способа и маршрута передвижения.

Основной целью создания математических моделей транспортных потоков является определение и прогноз всех параметров функционирования транспортной сети – интенсивности движения, объемов пассажирских перевозок, средних скоростей движения, задержек и потерь времени и т.д. Для моделирования и анализа транспортной сети применяются различные математические модели, которые отличаются между собой по направлениям решения поставленных задач, математическому аппарату, применяемым данным и точности описания транспортных процессов.

С учётом функциональной роли математические модели можно разделить на две объёмные группы:

- I) прогнозные модели;
- II) имитационные модели.

Прогнозное и имитационное моделирование – это два взаимодополняющих направления, целью которых является воспроизведение транспортных потоков в соответствии с действительностью. Создаваемые модели транспортных потоков впоследствии применяются для решения задач, связанных с увеличением эффективности пассажирских и грузовых перевозок и изменением конфигурации сети.

I. Прогнозные модели позволяют по геометрическим характеристикам транспортной сети и размещению объектов притяжения определить, какими будут транспортные потоки в этой сети. Прогноз загруженности транспортной сети в первую очередь предполагает расчёт усреднённых характеристик движения, таких как интенсивность транспортного потока, объём межрайонных корреспонденций, распределение автомобилей и пассажиров по путям движения. Прогнозные модели подразделяются на несколько групп.

## 1. Модели расчета матрицы корреспонденций между районами:

а) гравитационная модель. По аналогии с законом физики притяжения населения, за массу тела принимают объём корреспонденций, а физическое расстояние выражают любыми затратами, связанными с передвижением. При составлении матрицы корреспонденций транспортное расстояние выражается обобщенной ценой пути между двумя районами, т.е. величиной материальных и временных затрат на движение по пути. Достоинством этого метода является возможность учёта влияния различных факторов (особенностей населения, организации движения и др.) на выбор способа передвижения. Однако у этого способа есть существенный недостаток – если объём корреспонденций увеличится, например, в два раза, то расчетная корреспонденция увеличится в четыре раза, что не является достоверным. Также сообщение между двумя рассматриваемыми районами рассчитывается отдельно от других районов, особенности корреспонденции которых могут повлиять на расчёты;

б) модель конкурирующих центров. Она представляет собой обобщение гравитационной модели, так как включает в себя дополнительные корректирующие факторы – индекс посещаемости района, ранжирование районов;

в) энтропийная модель. Данная модель основана на вероятностном описании поведения пользователей транспортной сети, которые случайным образом распределяются по некоторому набору возможных состояний. Состояние системы, которое реализуется в реальности, обладает наибольшим статистическим весом. С математической точки зрения, это состояние описывает максимум некоторой функции – энтропии системы. В рамках максимизации энтропии представляется возможным рассчитать корреспонденции по типам передвижений;

г) модель промежуточных возможностей. Особенностью этой модели является предположение о том, что объём корреспонденции между двумя центрами притяжения населения определяется не столько расстоянием между ними, сколько количеством аналогичных центров притяжения на пути передвижения. Здесь также применяется ранжирование центров притяжения в зависимости от их удалённости от точки отправления пользователя.

## 2. Модели распределения потоков:

а) статическая модель равновесного распределения предполагает, что выбор пути участниками движения основан на стремлении минимизировать индивидуальную обобщенную цену поездки. По результатам такого выбора выявляется значение интенсивности потока на каждом из элементов сети. В свою очередь, интенсивность влияет на обобщенную цену пути и индивидуальный выбор пути. Таким образом, под воздействием этих факторов в системе устанавливается равновесное распределение потоков.

Сложность данной задачи с математической точки зрения заключается в том, что не сформулирован глобальный критерий, минимум или максимум которого говорил бы о достижении равновесного распределения;

б) модель многопользовательского равновесия – это динамическая модель распределения потоков, в основе которой лежат различия между классами автомобилей. Транспортные средства разных классов оказывают разное влияние на общую загрузку пути, т.е. грузовые автомобили сильнее воздействуют на степень загруженности, чем легковые. Также на дорогах существуют ограничения проезда автомобилей различных классов. Из этого следует, что представители разных классов распределяются по разным путям, но находятся во взаимодействии. Расчет матриц корреспонденции ведется в условных единицах, в которые необходимо перевести загрузку для каждого класса автомобилей;

в) модель равновесного распределения с переменным спросом на поток – это вторая динамическая модель распределения потоков, которая представляет собой алгоритм получения распределения и корреспонденций. Для этого объем корреспонденций между парами районов задается как функция от транспортного расстояния и обобщенной цены передвижения. Однако, эта модель предполагает единственное распределение, тогда как в действительности распределение изменяется с течением времени. Таким образом, для практического применения необходима доработка этой модели. Эти две модели относятся к детерминированным моделям поведения пользователей;

г) стохастическая модель. Так как пользователи не имеют достоверной информации обо всей сети в целом, то решения, которые они принимают при выборе пути передвижения, носят случайный характер. В основу стохастической модели положено разделение цены пути по предположениям пользователя и фактической цены пути. Важнейшим условием достижения равновесного распределения в данном случае является допущение того, что ни один из участников движения не предполагает, что может изменить свой путь следования, улучшив тем самым цену своей индивидуальной поездки. Сложность этого способа в том, что для вычислений недостаточно одних только данных по загрузке сети, а требуется ещё использовать все пути между районами и их цены, полученные ранее при расчетах;

д) динамические модели равновесного распределения представляют наиболее перспективными для разработки и изучения. От предыдущих моделей они отличаются введением дополнительной переменной – времени. Это значительно усложняет задачу, так как для отслеживания точного времени проезда по дуге требуется применение имитационных моделей. Это приводит к тому, что даже при использовании простых моделей необходим большой вычислительный ресурс, и практическое применение данных моделей становится возможным только при использовании суперкомпьютеров.

3. Модель оптимальных стратегий. Перечисленные ранее модели в большей степени ориентированы на личный транспорт пользователей. Модель оптимальных стратегий позволяет рассмотреть особенности загрузки сети общественного транспорта. Основная идея модели заключается в следующем: если водитель при движении до цели планирует свой оптимальный путь, то пассажир общественного транспорта вырабатывает для себя оптимальную стратегию поведения. Например, пассажир, может передвигаться на автобусах разных маршрутов в зависимости от того, какой из них придёт первым. Следовательно, данная модель основана на случайном выборе пользователей и является стохастической.

Для математического описания модели необходимо построить маршрутный граф. Попав в узел графа, пассажир может продолжить движение по одному из нескольких путей, таким образом формируется граф стратегий. Оптимальной стратегией будет такая, при которой время в пути минимально.

II. Имитационные модели, или модели динамики транспортного потока направлены на воспроизведение всех параметров движения, в том числе и развития процесса во времени. В качестве исходных данных для таких моделей принимаются усреднённые значения потоков и их распределение по улично-дорожной сети. При этом возможна как имитация движения отдельного автомобиля, так и описание динамики плотности транспортного потока в целом. Это позволяет оценить изменение скорости движения по транспортной сети, задержки транспортных средств на пересечениях, длины очередей на подходах к пересечениям и другие параметры. Существуют следующие имитационные модели.

1. Макроскопические модели – описывают движение автомобилей, оперируя такими понятиями, как поток, плотность, средняя скорость:

а) LWR-модель (модель Лайтхилла-Уизема-Ричардсона) – предполагает, что между скоростью потока и его плотностью существует взаимно-однозначная связь и применительно к количеству автомобилей выполняется закон сохранения масс. При этом средняя скорость потока является детерминированной. В связи с этим модель не будет достоверной при описании ситуаций, возникающих у выездов на второстепенные дороги, сужения дорог и др.

б) модель Уизема аналогична предыдущей модели за исключением того, что имеет дополнительное условие – предполагается, что при возрастании плотности потока водители снижают скорость движения, а при уменьшении плотности движутся с большей скоростью.

в) модель Пэйна – это своеобразный закон сохранения. В заданной модели не предполагается, что скорость движения находится в функциональной зависимости от плотности потока, и для неё записывается уравнение.

2. Кинетические модели основаны на динамике фазовой плотности потока, а именно плотности распределения автомобилей по координатам и индивидуальной скорости. Знание изменений фазовой плотности с течением времени позволяет рассчитать макроскопические характеристики движения.

Данные модели рассматривают изменения скоростей транспортных средств за счет процессов взаимодействия и релаксации. Взаимодействие автомобилей – это ситуация на дороге, когда быстро движущийся автомобиль догоняет впереди идущий автомобиль. При этом водитель более быстрого автомобиля либо снижает скорость, либо совершает обгон. При этом рассматриваются только парные взаимодействия.

Согласно данным, полученным эмпирически, в свободно движущемся потоке устанавливается равновесное распределение скоростей. Оно понимается как распределение водителей по скорости, с которой каждый из них двигался бы при условии отсутствия помех. Это приводит к релаксации фактического распределения к распределению по желаемым скоростям. Кинетические модели также нашли применение при описании движения смешанного потока и многополосного движения.

3. Микроскопические модели предназначены для моделирования движения каждого автомобиля, что позволяет получать более высокую точность описания движения автомобиля:

а) модель следования за лидером изначально предполагала, что ускорение конкретного автомобиля определяется состоянием соседних автомобилей. При этом наиболее сильное влияние оказывает предшествующий автомобиль. Впоследствии был предложен ряд поправок, так как простая модель не описывала неустойчивое поведение потока при возникновении заторов. Также согласно данной модели, ускорение единственного автомобиля на дороге будет равно нулю. В частных случаях это может быть верным, однако вполне логичным будет предположение, что в такой ситуации водитель по возможности увеличит или уменьшит свою скорость до желаемой;

б) модель оптимальной скорости основывается на суждении о том, что для каждого автомобиля есть своя безопасная скорость, которая зависит от дистанции до автомобиля-лидера. Отличием от предыдущей модели является то, что автомобиль, движущийся за лидером, адаптируется не к скорости лидера, а к оптимальной скорости в зависимости от расстояния до лидера. Данная модель очень чувствительна к выбору функции зависимости оптимальной скорости от дистанции. Кроме того, при больших значениях времени релаксации в модели происходят столкновения транспортных средств, а при малых значениях возникают нереалистичные ускорения;

в) модель «разумного водителя» (модель Трайбера) – одна из наиболее реалистичных моделей. Практическое применение модели позволило убедиться, что она воспроизводит основные наблюдаемые параметры транспортного потока с высокой достоверностью. Модель строится на предпо-

ложении о том, что ускорение автомобиля – это непрерывная функция скорости относительно лидера и дистанции до него. В модели используется несколько параметров, которые могут быть заданы индивидуально для каждого автомобиля: желаемая скорость движения, безопасный временной интервал, показатели чувствительности при ускорении и торможении, длина автомобиля. Общие характеристики потока можно получить, изучая движение идентичных автомобилей;

г) модель клеточных автоматов. Клеточные автоматы – это идеализированное представление физических систем, в котором время и пространство дискретны, и все элементы имеют набор возможных состояний. Так, скорость автомобиля и время являются дискретными переменными, а дорога разбивается на условные ячейки, каждая из которых может быть либо занята одним автомобилем, либо свободна. На каждом шаге по времени параметры каждой ячейки обновляются в соответствии с условиями:

- ускорение. Отображает тенденцию водителей двигаться с максимально возможной скоростью без нарушения правил. Если скорость автомобиля меньше максимально возможной, то она увеличивается, если эти скорости равны, то изменений не происходит;

- торможение. Предполагает отсутствие столкновений с другими автомобилями. Если дистанция до предыдущего автомобиля при данной скорости движения небезопасна, то скорость уменьшается;

- случайные возмущения. Позволяет учитывать случайные отклонения в поведении водителей. Если скорость водителя больше нуля, то она с определенной вероятностью может уменьшиться. Если скорость автомобиля равна нулю, то изменений не происходит;

- движение. Согласно с полученной на предыдущих этапах величиной скорости автомобиль продвигается вперед на соответствующее число ячеек.

Данные шаги описывают только самые основные свойства транспортного потока, для моделирования более сложных транспортных процессов необходимы дополнительные корректировки и условия. Это одна из наиболее перспективных для изучения моделей, однако она тоже имеет свой недостаток – при высокой плотности потока она является неустойчивой в связи со стохастичностью потока.

## **Заключение**

Таким образом, на основании приведенной информации можно сделать вывод о том, что создать единую модель, которая совместила бы в себе прогнозирование и имитацию транспортного потока, крайне сложно. В первую очередь сложности связаны с тем, что каждая из моделей работает с разными начальными условиями. Так, в прогнозных моделях используются характеристики улично-дорожной сети, её геометрия и параметры транспортного потока. Имитационные модели основаны на усреднённых



характеристиках потока и рассматривают каждый автомобиль как отдельно, так и во взаимодействии с автомобилями, движущимися рядом.

Приведенная классификация позволяет определить, какую модель удобнее использовать в зависимости от целей и задач, которые ставятся перед исследователями. При необходимости расчета корреспонденций и прогнозирования транспортного потока на конкретном участке улично-дорожной сети применяют прогнозные модели. Наиболее подходящими в данном случае являются модели, которые реализуют алгоритмы равновесного распределения. Для исследования параметров движения, пропускной способности улиц и дорог, задержек транспортного потока целесообразным будет использование имитационных моделей.

### *Литература*

1. Кадасев, Д.А. Повышение системной безопасности транспортных потоков оптимизацией светофорного регулирования их движения: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.10. – М., 2008. — 19 с.

2. Новиков, И.А. Внедрение интеллектуальных транспортных систем в рамках национальных программ повышения безопасности дорожного движения / И.А. Новиков, А.Е. Боровской, А.Г. Шевцова // Проблемы повышения уровня безопасности, комфорта и культуры дорожного движения: материалы III Международной научно-практической конференции – Харьков: ХНАДУ, 2013. – С. 218-219.

3. Семенов, В.В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса / В.В. Семенов. – М.: Транспорт, 2004. – 44 с.: ил.

4. Михайлов, А.Ю. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов / А.Ю. Михайлов, И.М. Головных. – Новосибирск: Наука, 2004. – 267 с., ил.

5. Сильянов, В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В.В. Сильянов – М.: Транспорт. – 1977. – 303 с.

6. Боровской, А.Е. Применение матриц корреспонденций для расчета необходимого количества мест на парковках торгово-развлекательных центров / А.Е. Боровской, М.Ю. Яблоновская // Проблемы автомобильно-дорожного комплекса России: Организация автомобильных перевозок и безопасность дорожного движения: материалы IX междунар. заочн. науч.-техн. конф. 31 октября 2013 г. / Пенза: ПГУАС, 2013. – Ч. 1. – С. 231–217.

7. Боровской, А.Е. О необходимости прогнозирования спроса на парковочные места при проектировании объектов массового притяжения населения / А.Е. Боровской, М.Ю. Яблоновская // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: материалы VIII междунар. науч.-техн. конф. 21-23 мая 2014 г., Пенза / [редкол.: Э.Р. Домке (отв. ред.) и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2014. – С. 114–118.