



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Эксплуатация транспортных средств и логистика»

## **Методические указания** к курсовой работе

# **«Моделирование транспорт- ных процессов»**

Авторы  
Гальченко Г. А.,  
Попов С. И.

Ростов-на-Дону, 2019

## Аннотация

Методические указания предназначены для студентов заочной формы обучения направления 23.03.01 Технология транспортных процессов.

## Авторы

к.ф-м.н., доцент кафедры «Эксплуатация транспортных средств и логистика» Гальченко Г.А.,

к.т.н., доцент, декан факультета «Транспорт, сервис и эксплуатации» Попов С.И.



## Оглавление

<b>Методические указания</b> .....	<b>4</b>
1 «Обзор методов и программных продуктов моделирования транспортных потоков» .....	6
Имитационное моделирование.....	10
1.2 «Компьютерное моделирование» .....	10
1.3 «Методы моделирования транспортных потоков» .....	11
1.4 «Программные продукты, используемые при моделировании транспортных процессов» .....	25
2 «Расчет основных транспортных характеристик с помощью программы "Материальный поток"» .....	28
<b>Список литературы</b> .....	<b>36</b>

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**Цель работы:** изучение электродинамического метода моделирования транспортных процессов, формирование у студентов профессиональных знаний и овладение навыками решения транспортных задач с применением информационных технологий.

### Задачи работы:

- выбор участка трассы по карте со спутника,
- по предварительным натурным наблюдениям:
- определение средней скорости движения ТС на выбранном участке -  $V$ ,
- расчет средней массы ТС -  $m$ ,
- определение угла наклона трассы  $\alpha$ .

С использованием возможностей MS EXCEL:

- расчет основных транспортных характеристик на выбранном участке трассы при различных погодных условиях ( $\varphi$ ) и различной скорости движения ( $V$ ) методом электромоделирования:
  - интенсивности движения  $I$ ,
  - напряжения движения  $V$ ,
  - сопротивления движению  $R$ ,
  - построение графиков зависимостей  $I(V)$ ,  $R(V)$ ,  $V(N)$ ,  $V(\alpha)$ .

### Основные сведения

Рост автомобильного парка и увеличение объема перевозок приводит к увеличению интенсивности движения, что в условиях городов с исторически сложившейся застройкой приводит к возникновению транспортной проблемы. Особенно остро она проявляется в тех пунктах улично-дорожной сети (УДС), где есть пересечение крупных транспортных магистралей. Здесь увеличиваются транспортные задержки, образуются очереди и заторы, что вызывает снижение скорости сообщения, неоправданный перерасход топлива и повышенное изнашивание узлов и агрегатов транспортных средств, а также ухудшается экологическая ситуация данного участка дороги. го движения и повышению негативных последствий - аварийности, стоимости перевозок, повышения загрязнения окружающей среды, шума, и т.д. На сегодняшний день существует ряд методик прогнозирования снижения эффективности УДС, а также ряд моделей для выведения ситуации из критической и повышения скорости и пропускной способности на УДС городов. Многие методики связаны либо с теорией массового обслуживания, либо с имитацией потоков жидкости. Теория мас-

сового обслуживания крайне сложна и требует огромного количества входных данных, а они очень быстро меняются, и переработка схемы УДС, режимов регулирования зачастую не успевает за прогрессом. Теории же, основанные на истечении жидкостей, устарели с преобразованием автопарка в скоростные и динамичные автомобили. Жидкости двигаются слоями и чем ближе к краям трубы (проезжей части) тем медленнее, - сегодня это не так. Назревшая транспортная проблема требует поиска принципиально новых подходов.

Основы математического моделирования закономерностей дорожного движения были заложены в 1912 году русским ученым, профессором Г. Д. Дубелиром. Первостепенной задачей, послужившей развитию моделирования транспортных потоков (ТП), стал анализ пропускной способности магистралей и пересечений. В настоящее время пропускная способность является важнейшим критерием оценки качества функционирования путей сообщения.

В последнее время в исследованиях транспортных потоков стали применять междисциплинарные математические идеи, методы и алгоритмы нелинейной динамики. Их целесообразность обоснована наличием в транспортном потоке устойчивых и неустойчивых режимов движения, потерь устойчивости при изменении условий движения, нелинейных обратных связей, необходимости в большом числе переменных для адекватного описания системы. Многие модели наряду с многочисленными преимуществами имеют значительные недостатки, позволяющие не в полном объеме учитывать основные характеристики транспортного потока, в конечном итоге давая незаконченный характер в моделировании транспортного потока. Анализ существующих теорий показывает целесообразность математического моделирования транспортных потоков и их научного обоснования, что в свою очередь, при использовании этих моделей, приведет к улучшению организации дорожного движения.

Поиск новой концепции организации движения проводится на основе абстрагирования представлений «автомобиль», «улично-дорожная сеть» и др., и, переходит к более общим явлениям материального мира, когда, например, крупный город с его развитой улично-дорожной сетью, дорожными знаками, светофорами, потоками автомобилей и др., представлен неким силовым полем. Согласно физическим воззрениям силовое поле - часть пространства, в каждой точке которой на помещенную туда материальную точку действует сила, величина и направление которой

зависит только от координат и времени, либо только от координат.

## **1 «Обзор методов и программных продуктов моделирования транспортных потоков»**

Рост автомобильного парка и увеличение объема перевозок приводит к увеличению интенсивности движения, что в условиях городов с исторически сложившейся застройкой приводит к возникновению транспортной проблемы. Особенно остро она проявляется в тех пунктах улично-дорожной сети (УДС), где есть пересечение крупных транспортных магистралей. Здесь увеличиваются транспортные задержки, образуются очереди и заторы, что вызывает снижение скорости сообщения, неоправданный перерасход топлива и повышенное изнашивание узлов и агрегатов транспортных средств, а также ухудшается экологическая ситуация данного участка дороги и повышению негативных последствий - аварийности, стоимости перевозок, повышения загрязнения окружающей среды, шума, и т.д.

На сегодняшний день существует ряд методик прогнозирования снижения эффективности УДС, а также ряд моделей для выведения ситуации из критической и повышения скорости и пропускной способности на УДС городов. Многие методики связаны либо с теорией массового обслуживания, либо с имитацией потоков жидкости. Теория массового обслуживания крайне сложна и требует огромного количество входных данных, а они очень быстро меняются, и переработка схемы УДС, режимов регулирования зачастую не успевает за прогрессом. Теории, основанные на истечении жидкостей, устарели с преобразованием автопарка в скоростные и динамичные автомобили. Жидкости двигаются слоями и чем ближе к краям трубы (проезжей части) тем медленнее, - сегодня это не так. Назревшая транспортная проблема требует поиска принципиально новых подходов. Основы математического моделирования закономерностей дорожного движения были заложены в 1912 году русским ученым, профессором Г. Д. Дубелиром.

Первостепенной задачей, послужившей развитию моделирования транспортных потоков (ТП), стал анализ пропускной способности магистралей и пересечений. В настоящее время пропускная способность является важнейшим критерием оценки качества функционирования путей сообщения. В последнее время в исследованиях транспортных потоков стали применять междисци-

плинарные математические идеи, методы и алгоритмы нелинейной динамики. Их целесообразность обоснована наличием в транспортном потоке устойчивых и неустойчивых режимов движения, потерь устойчивости при изменении условий движения, нелинейных обратных связей, необходимости в большом числе переменных для адекватного описания системы. Многие модели наряду с многочисленными преимуществами имеют значительные недостатки, позволяющие не в полном объеме учитывать основные характеристики транспортного потока, в конечном итоге давая незаконченный характер в моделировании транспортного потока.

Анализ существующих теорий показывает целесообразность математического моделирования транспортных потоков и их научного обоснования, что в свою очередь, при использовании этих моделей, приведет к улучшению организации дорожного движения. Поиск новой концепции организации движения проводится на основе абстрагирования представлений «автомобиль», «улично-дорожная сеть» и др., и, переходит к более общим явлениям материального мира, когда, например, крупный город с его развитой улично-дорожной сетью, дорожными знаками, светофорами, потоками автомобилей и др., представлен неким силовым полем. Согласно физическим воззрениям силовое поле - часть пространства, в каждой точке которой на помещенную туда материальную точку действует сила, величина и направление которой зависит только от координат и времени, либо только от координат.

Моделирование представляет собой один из основных методов познания, является формой отражения действительности и заключается в выяснении или воспроизведении тех или иных свойств реальных объектов, предметов и явлений с помощью других объектов, процессов, явлений, либо с помощью абстрактного описания в виде изображения, плана, карты, совокупности уравнений, алгоритмов и программ.

Возможности моделирования, то есть перенос результатов, полученных в ходе построения исследования модели, на оригинал, основаны на том, что модель в определенном смысле отображает (воспроизводит, моделирует, описывает, имитирует) некоторые интересующие исследователя черты объекта. Моделирование как форма отражения действительности широко распространено, и достаточно полная классификация возможных видов моделирования крайне затруднительна, хотя бы в силу многозначности понятия «модель», широко используемого не только в науке и

технике, но искусстве, и в повседневной жизни. Тем не менее, применительно к естественным и техническим наукам принято различать следующие виды моделирования, при котором совокупность уже известных фактов или представлений относительно исследуемого объекта или системы истолковывается с помощью некоторых специальных знаков, символов, операций над ними или помощью естественного, или искусственного языков.

В настоящее время исследовательские работы в области оптимизации дорожного движения рассматривают такие вопросы как: величина средней задержки транспорта, длина очереди перед перекрестком, интенсивность транспортного потока, напряженность транспортного потока, степень использования пропускной способности транспортного узла. Многие авторы считают, что создание единого критерия для оценки транспортного потока невозможно.

Выделяются следующие задачи при решении проблем организации дорожного движения (ОДД) в городах:

- мониторинг состояния ОДД - расчет основных транспортных характеристик на основе матрицы компетенций.
- использование информационных технологий в ОДД.
- устранение системных сбоев в дорожном движении.

Современное общество нуждается в постоянном увеличении объема транспортного сообщения, повышении его надежности, безопасности и качества. Это требует увеличения затрат на улучшение инфраструктуры транспортной сети, превращения ее в гибкую, высоко управляемую логистическую систему. При этом риск инвестиций значительно возрастает, если не учитывать закономерности развития транспортной сети, распределение загрузки ее участков. Игнорирование этих закономерностей приводит к частому образованию транспортных пробок, перегрузке/недогрузке отдельных линий и узлов сети, повышению уровня аварийности, экологическому ущербу.

Для поиска эффективных стратегий управления транспортными потоками в мегаполисе, оптимальных решений по проектированию улично-дорожной сети и организации дорожного движения необходимо учитывать широкий спектр характеристик транспортного потока, закономерности влияния внешних и внутренних факторов на динамические характеристики смешанного транспортного потока.

Актуальность моделирования в транспортной сфере невозможно переоценить, так как в современном мире с постоянным

развитием и прогрессом во всех сферах жизни человеку тоже необходимо подстраиваться под него, и в некоторых случаях учиться решать возникшие проблемы и непредсказуемые результаты такого прогресса. А эти результаты не всегда бывают положительными. И в качестве решения подобных вопросов используется моделирование транспортных процессов, которое позволяет находить способы разрешения сложившихся ситуаций на современных дорогах.

Моделирование представляет собой один из основных методов познания, является формой отражения действительности и заключается в выяснении или воспроизведении тех или иных свойств реальных объектов, предметов и явлений с помощью других объектов, процессов, явлений, либо с помощью абстрактного описания в виде изображения, плана, карты, совокупности уравнений, алгоритмов и программ.

Возможности моделирования, то есть перенос результатов, полученных в ходе построения исследования модели, на оригинал, основаны на том, что модель в определенном смысле отображает (воспроизводит, моделирует, описывает, имитирует) некоторые интересующие исследователя черты объекта. Моделирование как форма отражения действительности широко распространено, и достаточно полная классификация возможных видов моделирования крайне затруднительна, хотя бы в силу многозначности понятия «модель», широко используемого не только в науке и технике, но и в искусстве, и в повседневной жизни. Рассмотрим различные методы математического моделирования и моделирующие компьютерные программы.

*Математическое моделирование* - это моделирование, в котором при построении модели используются те или иные математические методы. На рис. 1. представлена схема моделирования загрузки транспортной сети, где перечислены многие математические методы, применяемые в моделировании.

Моделирование транспортных процессов



Рисунок 1. Моделирования загрузки транспортной сети

*Имитационное моделирование*, при котором логико-математическая модель исследуемого объекта представляет собой алгоритм функционирования объекта, реализованный в виде программного комплекса для компьютера.

Традиционно под моделированием на ЭВМ понималось лишь имитационное моделирование. Можно, однако, увидеть, что и при других видах моделирования компьютер может быть весьма полезен. Например, при математическом моделировании выполнение одного из основных этапов — построение математических моделей по экспериментальным данным — в настоящее время просто немислимо без компьютера. В последние годы, благодаря развитию графического интерфейса и графических пакетов, широкое развитие получило компьютерное структурно-функциональное моделирование. Положено начало привлечения компьютера даже к концептуальному моделированию, где он используется, например, при построении систем искусственного интеллекта.

## 1.2 «Компьютерное моделирование»

Компьютерное моделирование — метод решения задачи анализа или синтеза сложной системы на основе использования ее компьютерной модели. Суть компьютерного моделирования заключена в получении количественных и качественных результатов по имеющейся модели. Качественные выводы, получаемые по результатам анализа, позволяют обнаружить неизвестные ра-

нее свойства сложной системы: ее структуру, динамику развития, устойчивость, целостность и др. Количественные выводы в основном носят характер прогноза некоторых будущих или объяснения прошлых значений переменных, характеризующих систему.

Компьютерная модель сложной системы должна, по возможности, отображать все основные факторы и взаимосвязи, характеризующие реальные ситуации, критерии и ограничения. Модель должна быть достаточно универсальной, чтобы описывать близкие по назначению объекты, и в то же время достаточно простой, чтобы позволить выполнить необходимые исследования с разумными затратами.

Все это говорит о том, что моделирование систем, рассматриваемое в целом, представляет собой скорее искусство, чем сформировавшуюся науку с самостоятельным набором средств отображения явлений и процессов реального мира. Поэтому исключительно сложными, а, по нашему мнению, и невозможными, являются попытки классификации задач компьютерного моделирования или создания достаточно универсальных инструментальных средств компьютерного моделирования произвольных объектов. Однако если преднамеренно сузить класс рассматриваемых объектов, ограничившись, например, задачами компьютерного моделирования при системном анализе объектов организационного управления, то возможно отобрать ряд достаточно универсальных подходов и программных средств.

### 1.3 «Методы моделирования транспортных потоков»

Рост количества личных автомобилей опережает рост увеличения ёмкости дорожной сети: гораздо проще покупать новые машины, чем строить новые шоссе в глухо застроенных мегаполисах. Это ведёт не только к растущим объёмам выбросов в атмосферу углекислого газа, тяжёлых металлов и прочих загрязняющих веществ: миллионы человек вынуждены ежедневно тратить немалое количество личного времени в заторах по пути домой или на работу. Причём это проблема не только водителей, но и пользователей любого наземного общественного транспорта. Существует множество возможных путей для решения транспортной проблемы. Наиболее эффективный способ – повысить связность дорожной сети с помощью постройки новых магистралей, что позволит перенаправить автомобильные потоки в обход перегруженных областей и предоставить водителям больший выбор маршрутов. Следующее очевидное решение – нарастить

пропускную способность существующих дорог с помощью дополнительных полос. Это возможно только при условии, что градостроители предусмотрели резервные площадки для подобных реконструкций, иначе расширять шоссе будет просто некуда. Выделение полос для автомобилей с пассажирами (highoccupancyvehicle (HOV) lines), а также полос для общественного транспорта, приносит значительные результаты только при условии ощутимого и неотвратимого наказания для нарушителей, а в ряде случаев может ещё сильнее снизить среднюю скорость движения. Четвёртый вариант – ограничение въезда в наиболее загруженные области; впервые подобная мера была применена в Риме в I веке н.э., где из-за невиданные количества конного транспорта власти были вынуждены разрешить въезд в центр города только муниципальных транспортных средств. Какая бы ни была выбрана стратегия, оценить её эффективность до практической реализации очень непросто – тем временем, многие меры требуют непростых манипуляций, серьёзных материальных затрат и значительного количества времени. Просчёты могут не только не привести к ожидаемым результатам, но и вызвать транспортный коллапс в таких мегаполисах, как Москва, Нью-Йорк и Токио – поэтому проблема моделирования автомобильных потоков играет важную роль в городском планировании.

### Макроскопические модели

Учёные пытались описать и формализовать процессы, лежащие в основе феноменов транспортного потока, более полувека. В 1950х сэр Джеймс Лайтхилл, эксперт в гидродинамике, заметил, что поток автомобилей на дороге имеет много общего с потоком жидкости в трубе. Первая известная компьютерная транспортная модель (Lighthill-Whitham-Richardsmodel) полностью описывает абстракцию дорожного потока с помощью дифференциальных уравнений. Это была первая макроскопическая транспортная модель.

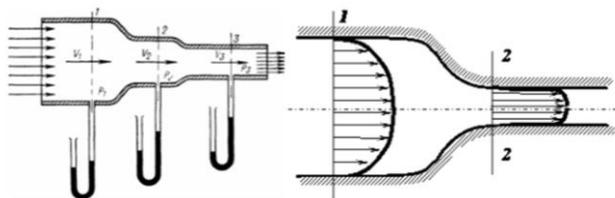


Рисунок 1.1. Иллюстрации принципов гидродинамики

На тот момент использование готового математического аппарата, который уже применялся для вычислений на ЭВМ, для решения проблемы из совершенно иной области было интересным решением. Макромодели не рассматривают индивидуальные транспортные средства, которые в данных условиях являются не более чем молекулами жидкости; такие модели способны лишь имитировать общие свойства автомобильного потока. Несмотря на этот факт, модели данного класса способны имитировать несколько характерных для автомобильного потока процессов, начиная с изменения скорости в сужениях и расширениях дороги, заканчивая «старт -стоп движением» в пробках (которое может быть хорошо описано как ударные волны). Благодаря макроскопическим транспортным моделям было получено множество сведений о реальном автомобильном движении, что говорит о их исторической важности для данной темы. Простота, ограничения и допущения, лежащие в основе моделей данного класса, объясняют их врождённые недостатки. Макромоделям не хватает детализации, и они не могут генерировать надёжных результатов для дорожных сетей с очень ограниченной ёмкостью, к коим относятся дороги больших городов. Вождение автомобиля не ограничивается ускорением и торможением – небольшим количеством таких параметров, как «скорость потока» и «плотность потока» невозможно описать разнообразие возникающих на дорогах ситуаций.

### **Модель оптимальных стратегий**

Процесс формирования загрузки сети общественного транспорта имеет особенности, не характерные для загрузки сети автомобильного транспорта. Если пользователь сети УДС в ситуации равновесия использует оптимальный путь для своего движения до цели, то пользователь сети пассажирского транспорта может определить для себя оптимальную стратегию поведения в ходе движения к цели. Под стратегией поведения пассажира в сети общественного транспорта понимается набор правил, руководствуясь которыми в процессе своего движения, пользователь достигает точки назначения. Простейшим примером стратегии является следование априорно выбранному пути, что соответствует поведению участников движения в моделях равновесного распределения. Более сложные стратегии возникают, если пассажир в ходе движения принимает те или иные решения о продолжении своего пути в зависимости от информации, полученной в ходе движения. Например, решение, принимаемое в очередном пе-

ресадачном узле, может зависеть от того, какое транспортное средство будет отправляться из узла первым. Еще более сложные стратегии предусматривают, например, такую возможность: пассажир может принять решение сменить транспортное средство, увидев из окна автобуса, что есть возможность пересесть на автобус-экспресс, и др.

Стандартная модель оптимальных стратегий исходит из упрощенного описания поведения пользователя. Согласно этой модели. выбор стратегии достижения цели состоит в следующем:

- для каждого узла, в котором может оказаться пассажир в процессе движения к цели, среди всех возможных продолжений фиксируется некоторый выбранный набор. Будем говорить, что выбранные продолжения «включены в стратегию». Важно, что набор фиксируется «заранее», т.е. не в процессе движения, а на этапе выбора стратегии;

- оказавшись в том или ином узле, пользователь всегда выбирает то из продолжений, включенных в стратегию, которое первым предоставит возможность обслуживания (отправление транспортного средства). Поскольку события прихода и отправления транспортных средств можно рассматривать как случайные события с некоторым законом распределения, то конкретные пути реализуются с той или иной вероятностью. Таким образом, модель оптимальных стратегий является изначально стохастической моделью.

Для математического описания модели необходимо расширить транспортный граф до маршрутного графа. Маршруты общественного транспорта описываются дополнительными узлами и дугами. Будем называть узлы и дуги обычного графа базовыми узлами и дугами в маршрутном графе. Рассмотрим базовую дугу, по которой проходят маршруты общественного транспорта. Над каждой такой дугой размещается к маршрутных дуг, соответствующих поездке вдоль этой дуги на одном из маршрутов. Сама базовая дуга также входит в граф как дуга для пешеходного движения. Для упрощения описания принимается, что остановки общественного транспорта всегда располагаются в узлах базового графа. Все маршрутные узлы, в которых делается остановка, соединяются с соответствующим базовым узлом условными дугами-посадками и высадками.

Данное выше определение стратегии может быть сформулировано в терминах маршрутного графа так: в каждом узле маршрутного графа среди всех исходящих дуг фиксируется неко-

торый набор дуг, включенных в стратегию. Попав в узел, пользователь может продолжить движение по одной из фиксированных дуг. Таким образом, задание стратегии эквивалентно заданию некоторого подграфа всего маршрутного графа. Будем называть этот подграф графом стратегии.

Стратегия называется допустимой, если:

- она не содержит циклов, т.е. двигаясь по дугам, включенным в стратегию, нельзя вернуться повторно в уже пройденный узел;

- она обеспечивает достижение цели, т.е. выбирая в каждом узле произвольную дугу, из числа включенных в стратегию, пользователь всегда за конечное число шагов попадет в целевой узел.

Для каждой дуги маршрутного графа заданы две характеристики:

- $c_a$  — обобщенная цена дуги, включающая, как всегда, среднее время движения по дуге и другие добавки, выраженные в условных минутах. Будем в дальнейшем говорить просто о времени.

- $f_a$  — частота обслуживания. Эта характеристика имеет смысл только для дуг посадок. Она численно равна среднему количеству отправлений транспортных средств из данного узла по тому маршруту, на который осуществляется посадка.

Величина  $1/f_a$  — это средний интервал отправления.

Для единообразия описания транспортного графа можно считать, что все дуги обладают этими двумя характеристиками. При этом частота обслуживания для всех дуг, не являющихся дугами-посадками, равна бесконечности. Соответственно, среднее время ожидания обслуживания на этих дугах равно нулю.

Предполагая, что время прибытия пассажира в узел распределено равномерно, а интервал отправления постоянный и равен  $1/f_a$ , получим, что среднее время движения по дуге, включая ожидание, равно  $1/2f_a + c_a$ . Зная обобщенную цену и частоту всех дуг, можно вычислить среднее время достижения цели от любого узла при использовании данной стратегии [2]. Это можно сделать рекуррентно. Пусть  $k$  — номер целевого узла,  $t_i$  — среднее время достижения узла  $k$  из узла  $i$  при использовании данной стратегии. Очевидно,  $t_k = 0$ . Рассмотрим произвольный узел  $i$ . Возможные продолжения согласно выбранной стратегии — это дуги  $a = (i;j) \in A+i$ . Пусть  $t_j$  уже вычислено для всех конечных уз-

лов этих дуг. Тогда среднее время  $t_i$  дается формулой

$$t_i = \left(1/2 + \sum f_a(c_a + t_j)\right) / \sum f_a. \quad (1)$$

Пользуясь этой рекуррентной формулой, можно вычислить среднее время для любого узла.

Оптимальной стратегией для достижения цели  $k$  из узла  $i$  называется стратегия, при которой среднее время достижения цели из данного узла наименьшее среди всех допустимых стратегий. Среднее время в оптимальной стратегии можно также называть потенциалом узла  $i$  по отношению к узлу  $k$ .

Оптимальная стратегия обладает следующим важным свойством: оптимальная стратегия для любого узла отправления  $i$  одновременно является оптимальной стратегией и для всех промежуточных узлов  $j$ , которые могут встретиться при движении в соответствии с этой стратегией. Данное свойство вполне аналогично свойству Беллмана для кратчайших путей, согласно которому отрезок кратчайшего пути от некоторого промежуточного узла до конечного узла сам является кратчайшим путем от промежуточного узла. Действительно, если при добавлении или исключении из стратегии какой-либо исходящей дуги узла  $j$  потенциал этого узла уменьшается, то, очевидно, должны уменьшиться и потенциалы всех узлов, из которых можно попасть в узел  $j$ . Данное свойство позволяет определить одну стратегию для достижения цели  $k$ , являющуюся оптимальной сразу для всех узлов отправления. Действительно, пометим в каждом узле сети исходящие дуги, входящие в оптимальную стратегию для этого узла. Совокупность этих помеченных дуг, очевидно, определит оптимальную стратегию для всех узлов.

Для вычисления оптимальной стратегии (т.е. выделения подграфа в маршрутном графе) для произвольного целевого узла применяется алгоритм, аналогичный алгоритму послойного расширения при поиске кратчайших путей.

Рассмотрим теперь задачу распределения корреспонденций  $F_{pq}$  по маршрутному графу. Предполагаем, что все участники движения (пассажиры) следуют оптимальным стратегиям. Поскольку цены и частоты дуг в модели оптимальных стратегий считаются постоянными, достаточно перебрать все районы прибытия  $q$ , для каждого из них вычислить оптимальную стратегию, распределить корреспонденции из всех других районов в данный район согласно этой стратегии, а получившиеся потоки сложить.

### **Метод клеточных автоматов**

Очень удобным аппаратом для реализации микроскопических моделей оказались клеточные автоматы. Эта теория зародилась в середине XX века в трудах нескольких независимых учёных (Конрад Цузе, Джон фон Нейман) . Наиболее полно она проработана известным математиком Джоном фон Нейманом, сотрудничавшим в то время со Станиславом Уламом.

Клеточные автоматы в простейшем виде представляют собой двумерную сетку произвольного размера, состоящую из ячеек. Состояние сетки (конфигурация) обновляется с течением времени, причём состояние каждой ячейки в следующий момент времени зависит от состояния ближайших её соседей (смежных ячеек) и, возможно, от её собственного состояния на текущей итерации. Количество возможных состояний ячейки конечно. В моделях клеточных автоматов дорога разбивается на клетки, время считается дискретным. Каждая ячейка может находиться в каком-либо состоянии, которое определяется набором правил, зависящих от состояний соседних ячеек. Случайные возмущения вносят элемент стохастичности. Достоинством такого подхода является высокая эффективность при компьютерном моделировании. Недостатком же является относительно низкая точность в микроскопических масштабах, из-за дискретной природы клеточного автомата

Дороги в реальном мире могут состоять из более чем одной полосы в одном направлении. На данный момент наиболее популярным методом микроскопического моделирования транспорта является использование метода клеточных автоматов, который позволяет симитировать многополосные магистрали. Главная идея состоит в том, чтобы представлять дороги в виде численных матриц – каждая строка соответствует полосе, каждая ячейка соответствует участку дороги установленной длины, чаще всего около семи метров. Некоторые числа в матрице означают автомобили, передвигающиеся с соответствующей скоростью, с помощью других могут быть закодированы пустые участки дорог, аварии и другие препятствия.

## Моделирование транспортных процессов

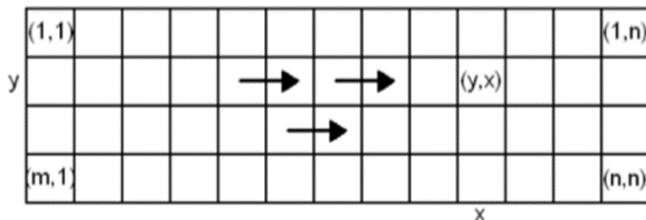


Рисунок 1.2. Участок дороги в представлении метода конечных автоматов

Протяжка модели производится шаг за шагом путём применения некоторого набора правил к каждой ячейке, как «переместиться на  $n$  ячеек вперёд», если впереди нет препятствий и медлительных транспортных средств, или «сменить полосу и переместиться на  $n-1$  ячеек вперёд» и т.д. Полностью формализованные модели могут даже иметь набор пред рассчитанных действий для набора возможных ситуационных паттернов; в этом случае системе нужно лишь подобрать подходящее правило для участка матрицы вокруг «автомобиля» и перезаписать его «ответом» из библиотеки действий для получения позиции машины на следующем шаге. Нагель и Шрекенберг описали первую реализацию транспортной модели на клеточных автоматах в 1992 году; она была очень проста и симулировала только одну полосу. С тех пор методы, базирующиеся на клеточных автоматах, были признаны наиболее адекватными и эффективными для моделирования транспортных потоков, большинство разрабатываемых на данный момент моделей основаны на этом подходе. Они уже сейчас используются для анализа эффективности перекрёстков и затруднённого дорожного движения, но существует проблема – в подобных модели не предусмотрена возможность назначения отдельным автомобилям индивидуальных целей, а это очень важно для изучения дорожного потока в масштабах города.

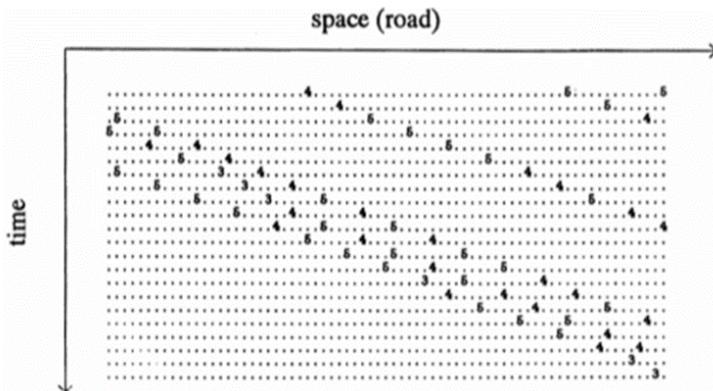


Рисунок 1.3. Пространственно-временная диаграмма модели на клеточных автоматах Нагеля – Шрекенберга

### Многоагентные модели

В агентно-ориентированных транспортных моделях главным объектом является водитель. Каждый водитель вместе с автомобилем может обладать широким набором индивидуальных параметров: характеристики автомобиля, оказываемое воздействие на окружающую среду, информация о привычках водителя и т.д.

Весь набор параметров каждого водителя используется на каждом шаге модели. Недостатком данного метода является наибольшая сложность модели среди всех рассмотренных, а также высокие требования к вычислительным системам – но на сегодняшний день это является приемлемой ценой.

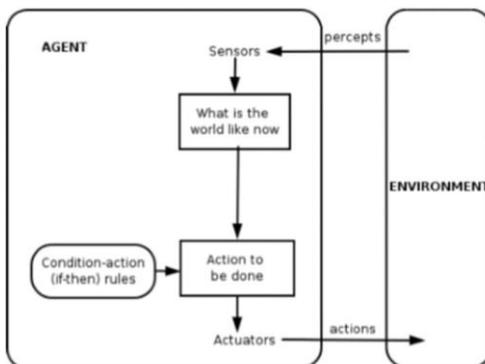


Рисунок 1.4. Концепция агента

Одной из наиболее интересных особенностей многоагентных систем является взаимодействие между агентами. Каждый агент с точки зрения остальных агентов является «чёрным ящиком» с неизвестными параметрами и непредсказуемыми намерениями. Агенты вынуждены действовать в соответствии с текущим окружением (информация о котором может быть неполной: водитель может не видеть сквозь здания и не знать точного коэффициента сопротивления асфальта), принимая во внимание сигналы от других агентов и доступные невооружённому взгляду параметры (каждый водитель должен каким-то образом оценивать скорость окружающих транспортных средств).

Каждый агент «думает» за себя как настоящий водитель, его действия не определяются кем-то извне – внутренняя и внешняя по отношению к агенту информация обрабатывается с помощью экспертной системы, которая выдаёт вывод о действии, которое будет выполнено водителем на следующем шаге. Экспертная система содержит базу знаний, формируемую разработчиком модели во время анализа реального опыта вождения людей; эта информация может быть получена с помощью опросов, бесед с водителями или даже с помощью сбора телеметрии с транспортных средств.

Идея состоит в том, чтобы использовать матрицы для дискретизации дорог – подобная мера должна уменьшить общее количество вычислений по сравнению с континуальными моделями, но не обязывает хранить информацию об автомобилях внутри ячеек. Элементы дорожных матриц будут хранить только идентификационные номера автомобилей и различных дорожных объектов, что позволит эмулировать огромное количество транспортных средств; обрабатывать их параметры и определять их действия на каждом шаге будет единая экспертная система. Подобный подход хорошо ложится на объектно-ориентированную парадигму программирования и даёт возможность вносить почти любые изменения в модель автомобиля. Станет возможным имитировать не только обычные автомобили, но и наземные транспортные средства всех возможных видов, включая автобусы, троллейбусы, трамваи, поезда, грузовики, автопоезда и даже велосипеды. Планируется выделить два отдельных слоя «мышления» агентов: стратегический и тактический. Первый будет обрабатывать основные цели агента, например, отвечать за выбор пути к пункту назначения. Тактический слой будет ответственен за принятие ситуационных решений, которые будут направлены на избежание опасных ситуаций – следует ли перестраиваться, какой скорост-

ной режим уместен в данный момент и т.д. Экспертная система водителя не будет обладать исчерпывающей базой знаний – данная работа не предполагает идеальное соответствие модели с реальным миром, которое является практически недостижимым ввиду обилия влияющих на транспортный поток случайных факторов; её должно быть достаточно для имитации наиболее значимых аспектов процесса вождения. Поведенческие паттерны человека тоже невозможно полностью формализовать, поэтому использование эвристик является неотъемлемой частью разрабатываемой модели. Но, так или иначе, нет причин полагать, что вышеперечисленные аппроксимации не позволят создать достаточно адекватную реальности модель транспортного движения.

### Использование метода перколяции для моделирования транспортных потоков

В современных разработках МАДИ используются модели случайного графа и теория перколяции, которая применяется, в основном для моделирования протекания жидкостей на абстрактных решетках. В работах Московского технологического университета (МИРЭА), г. Москва, Россия. Теорию перколяции применили к случайному графу дорожной сети. Идея метода перколяции заключается в следующем: если убрать все улицы и оставить одни перекрестки, то получим некоторую решетку, через которую "просачиваются" машины. Теория перколяции обычно применяется к анализу просачивания жидкости. В МАДИ ее применили для анализа транспортной ситуации на загруженных перекрестках.

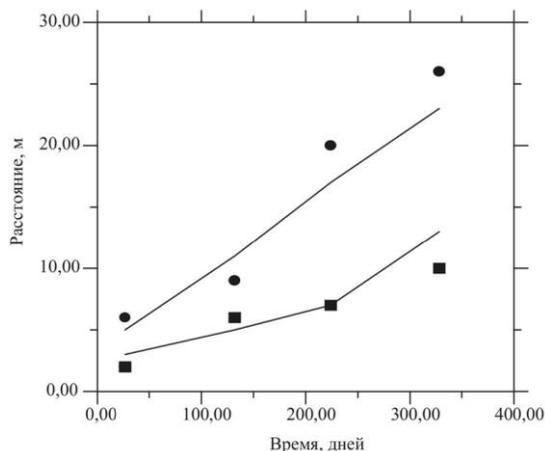


Рисунок 1.5. Метод перколяции

В результате работы микроскопических методов, как правило, получают следующие данные: длина очереди, время задержки транспортных средств, средняя скорость, максимальная или минимальная скорость, время движения автомобилей. Основным достоинством микроскопических моделей является возможность получения оценок с высокой точностью. Однако высокая степень детализации в микромоделях влечет за собой следующие недостатки: требуется много ресурсов для сбора исходных данных; для получения достоверных результатов нужно большое число прогонов модели; необходима калибровка параметров; высокая чувствительность к ошибкам в исходных данных; сложности в получении аналитических зависимостей.

### **Метод электродинамического моделирования транспортных потоков**

По своей сути транспорт является проводником материального потока, единственной причиной его движения на межорганизационном уровне. Отечественные предприятия транспорта, особенно те, которые связаны с международными перевозками, одними из первых почувствовали необходимость внедрения информационных технологий в управление производственными процессами. Очевидным стало то, что эффективная деятельность транспортных компаний уже невозможна без широкого использования информационных технологий.

Дифференцированный контроль на трассе с помощью бортовой ЭВМ и электронный обмен данными позволяет существенно увеличить оборот информации, отказаться от путевых документов и тем самым экономить значительные финансовые средства. На транспортных средствах устанавливаются электронные тахографы и бортовые вычислительные системы с магнитными носителями информации, позволяющие автоматизировать учет работы транспортного средства и водителей, оперативно контролировать соблюдение режимов труда и отдыха. Кроме того, важное значение имеют программы маршрутизации и калькуляции себестоимости, оптимальной загрузки транспортных средств, снабжения запасными частями. С их помощью можно выполнять расчеты протяженности маршрутов, времени их прохождения, остановок на пограничных переходах и заправках, оперативно оценивать дорожные условия и расход топлива на маршруте.

Среди отечественных программ следует отметить геоинформационные системы (к примеру, ГИС Омск. Новосибирск и

т.д.), которые широко используются в практике составления маршрутов. Среди отраслевых решений можно привести автоматизированную информационную систему "RG-Soft: Оконная Компания", созданную на платформе "1С: Предприятие 8", которая разработана специально для производственных компаний, занимающихся производством, реализацией и установкой пластиковых окон.

Конфигурация "RG-Soft: Оконная компания" предназначена для автоматизации учета и анализа бизнес-процессов производителей и дилеров окон, и дверей. Система охватывает широкий спектр управленческих задач от приема и обработки заказов до анализа финансовых результатов деятельности предприятия. Конфигурация содержит три интерфейса: заявки и управление замерами; доставки; журнал договоров.

Другой пример отечественной разработки в области системы контроля транспорта - система "Каньон". Это аппаратно-программный комплекс, предназначенный для повышения эффективности эксплуатации авто- и строительной техники в части контроля за выполнением транспортного задания и экономии ГСМ. Система "Каньон" состоит из бортового микропроцессорного устройства (прибор "Каньон"), регистрирующего в энергонезависимой памяти параметры со встроенного GPS-приемника (координаты маршрута движения) и параметры штатного электрооборудования и ряда дополнительных датчиков, установленных на автотранспортном средстве. Оперативные данные переносятся в информационную систему по возвращении из поездки. Система предназначена для решения комплекса проблем, связанных с управлением автотранспортным предприятием. Благодаря регистрации первичной информации, позволяющей контролировать маршрут и скорость движения, место и продолжительность стоянок.

Современные программно-аппаратные средства находят широкое применение во всем мире и внедряются в практику в Российской Федерации. Одним из последних решений в этой области является создание отечественной системы навигации ГЛОНАСС, которая в настоящее время развивается и проходит настройку.

Однополосная модель или правило движущегося потока

Простейшая модель транспортного потока, в которой автомобили движутся в одном направлении, останавливаясь и продолжая движение в зависимости от наличия автомобилей впереди. Из-за существования такой сферы применения модели она

получила дополнительное название — “правило транспортного потока”.

Состояние автомата описывается с помощью одномерного массива ячеек, каждая из которых содержит одно из значений — 0 или 1. На каждом шаге к автомату применяется набор правил, приведённый в таблице.

Нам необходимо вычислить состояние центральной ячейки в первой строке. Левая и правая ячейки будут определять новое состояние центральной ячейки.

Шаблон

111      110      101      100      011      010      001      000

Центральная клетка

10      1      1      1      0      0      0

Правило перехода между клетками описано в таблице

Шаг      Конфигурация

00	1	0	1	0	1	1	1
10	1	1	1	1	0	0	0
20	1	1	0	1	1	1	0
30	0	0	1	0	0	0	0
40	0	1	1	1	1	1	0
50	0	0	0	0	0	1	0

Математически правила перехода автомобиля из клетки в клетку можно записать для различных состояний следующим образом:

Ускорение

Если скорость рассматриваемого автомобиля меньше максимально разрешенной скорости, то она может увеличиться на единицу, т.е. это ускорение.

$$v_i(t) = \min(v_i(t - 1) + 1, v_{max}). \quad (28)$$

Торможение

Если новая скорость рассматриваемого автомобиля равна

или больше расстояния до ближайшего автомобиля, то эта скорость приравнивается к расстоянию до впереди идущего автомобиля.

$$v_i(t) = \min(v_i(t), g_i(t - 1)). \quad (29)$$

Случайные возмущения

С некоторой вероятностью водитель может изменить скорость - это случайные возмущения, которые учитываются по формуле:

$$\text{if } \xi(t) < p \text{ then } v_i(t) = \max(v_i(t) - 1, 0). \quad (30)$$

Новое положение автомобиля в клетке

Новое положение автомобиля в сетке автомата определяется по формуле:

$$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t). \quad (31)$$

Первое выражение определяет стремление водителей ехать с максимальной скоростью, второе выражение гарантирует, что не будет столкновений с впереди идущими автомобилями. Третье условие учитывает возможные случайные изменения скорости водителями. Четвертое выражение определяет на сколько клеток в нашем клеточном автомате передвинется автомобиль за одну итерацию.

## 1.4 «Программные продукты, используемые при моделировании транспортных процессов»

Программный продукт "ANYLOGIC"

В настоящее время разработан мощный и одновременно дорогостоящий программный комплекс "ANYLOGIC" имитационного моделирования.

"ANYLOGIC" позволяет разрабатывать имитационные модели в таких областях как:

- производство;
- логистика и цепочки поставок;
- бизнес-процессы и сфера обслуживания;
- управление активами и проектами;
- телекоммуникации и информационные системы;
- пешеходная динамика.



Рисунок 4.1. Модель кольцевого пересечения

ANYLOGIC используется в области дорожного движения при решении таких задач как:

- проектирование дорог и автомагистралей;
  - моделирование изменений, дополнений и перекрытий в дорожной сети;
  - анализ пропускной способности дорог, включая статистику возникновения пробок и заторов;
  - размещение светофоров и оптимизация светофорных фаз
- интеграция общественных объектов и зданий в дорожную сети и др.

ANYLOGIC работает, используя гибкий и мощный инструмент, называемый БИБЛИОТЕКА ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ.

Использование этой библиотеки позволяет моделировать дорожные сети, создавая реалистичные имитационные модели.

Разрабатываемые имитационные модели используются при принятии наиболее эффективных решений в случае проектирования новых дорог или оснащения уже имеющихся магистралей. ANYLOGIC позволяет многократно провести визуальный эксперимент и найти оптимальную модель. В последствии это реализуется в реальной транспортной ситуации.

#### Программа Zig-Zag

Как работает Zig-Zag?

- Мониторинг онлайн на вашем мобильном устройстве
- Контроль за исполнением заявок через мобильное приложение

жение

- Сокращение времени на планирование логистики
- Оптимальное распределение доставки на транспортный парк

парк

- Экономия времени и ГСМ.

Zig-Zag умеет не только распределить грузы по транспорту, но и организовать эффективную доставку до клиента. Ключевая особенность сервиса – умение математически точным методом рассчитывать оптимальный маршрут с учетом объема и веса груза, географии доставки, режима работы клиента или договоренности по времени доставки.

Это позволяет вам держать сервис доставки на высочайшем уровне, удовлетворяя запросы даже самых требовательных клиентов.

Сервис Zig-Zag позволяет выбирать между несколькими режимами построения маршрута. Один из них – «режим максимизации веса». Он лучше всего подходит в ситуациях, когда курьер гарантированно не успевает посетить все адреса, поэтому ему нужно построить маршрут с минимальными потерями. Эту возможность высоко оценят компании, обслуживающие банкоматы или терминалы, которым важнее объехать самые переполненные аппараты, а остальные оставить на другой день. Если вдруг вам необходимо учесть какой-либо экзотический параметр, то на помощь придут инструменты построения маршрута в ручном режиме. С их помощью можно не только построить полностью «руководный», но и внести коррективы в маршрут, предложенный программой интенсивности автомобилей и пешеходов, далее рассчитать пропускную способность и коэффициент загруженности перекрестка.



Рисунок 10. Вид терминала программы ZIG-ZAG

### Оптимальность маршрута

В основе логики сервиса Zig-Zag – чистая математика, позволяющая сделать маршрут каждого водителя максимально эффективным. Программа выстраивает разрозненные адреса в единый последовательный маршрут, удерживая «в памяти» важные условия

### Минусы работы вручную:

Неэффективное распределение времени на доставку  
 Высокие расходы на ГСМ и амортизацию транспорта.  
 Необходимость содержать дополнительных сотрудников для составления маршрутов.

Отсутствие возможности централизованной корректировки маршрута в реальном времени. Отсутствие оперативного контроля за работой.

### Плюсы работы с Zig-Zag:

- Формирование четкого графика доставки без лишних временных затрат.
- Значительная экономия на топливе и обслуживании автомобилей.

Оптимизация кадрового состава, экономия на персонале.

- Оперативное внесение корректив в текущий маршрут, возможность мгновенного изменения маршрута.

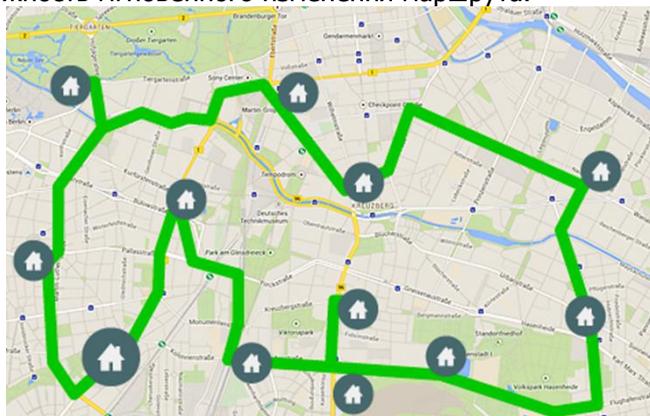


Рисунок 10. Оптимальный маршрут

## 2 «Расчет основных транспортных характеристик с помощью программы "Материальный поток"»

В рамках работы творческого коллектива научного кружка "Моделирование транспортных потоков" на основе метода элек-

тродинамического моделирования разработана компьютерная программа "Материальный поток". Программа позволяет на основе исходных данных - матрица корреспонденций исследуемого участка - проводить расчет основных транспортных характеристик интенсивности и напряженности движения, сопротивления движению. результаты расчетов могут быть выведены в виде графиков и таблиц, которые сохраняются в файлах.

Создан движок для задания угла наклона трассы (учитывается наклон или подъем трассы), погодные условия, количество транспортных средств на участке. Остальные параметры считываются из файла. Проведен расчет основных транспортных характеристик рассматриваемого участка трассы с помощью компьютерной программы. Исходные данные - матрица корреспонденций. Натурные наблюдения проводились с 17:00 до 18:00 три дня в неделю.

### Метод электродинамического моделирования транспортных потоков

Метод электродинамического моделирования транспортных потоков автомобилей, позволяет решать целый ряд задач организации дорожного движения, до последнего времени недоступных при традиционных подходах.

Установлены аналогии между основополагающими характеристиками (сила тока, напряжение, сопротивление) и характеристиками транспортного потока.

Таблица 1

Аналогии параметров транспортного (материального) потока и электрического тока

Электрический ток	Транспортный (материальный) поток
$I_T$ - сила тока	$I$ - интенсивность материального потока: $I = m \frac{N}{l} \bar{v}$
$U_T$ - напряжение	$U$ - напряжение материального потока: $U = mg(\psi \pm i)l$
$R_T$ - сопротивление	$R$ - сопротивление движению материального потока: $R = \frac{g(\psi \pm i)l}{q\bar{v}}$

#### Порядок выполнения

1. Представить карту выбранного участка и исходные данные натурных измерений ( матрицу корреспонденций )

## Моделирование транспортных процессов

Выбран перекресток ул. Орбитальная - ул. Беляева г. Ростов-на-Дону



Рисунок 1. Вид перекрестка со спутника

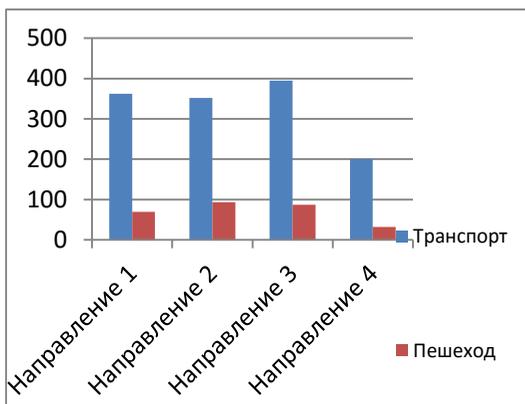


Рисунок 2. Натурные наблюдения

Таблица 1

Матрица корреспонденций для выбранного участка трассы

$m, \tau$	1,5	$q(пн)1$	61	
$l, км$	0,5	$q(пн)2$	79	
$V, км/ч, шаг 5$	0-35	$q(пт)1$	68	
$N(пн)1, шт$	550	$q(пт)2$	88	
$N(пн)2, шт$	711	на спуске $\alpha=3^{\circ}$	0,998	
$N(пт)1, шт$	612	на подъеме $\alpha=3^{\circ}$	0,999	
$N(пт)2, шт$	793	на спуске $\alpha=6^{\circ}$	0,995	
$l, км$	0,5	$\Psi 1$	0,006	
$\alpha 1$	$6^{\circ}$	$\Psi 2$	0,012	

$a_2$      $3^0$      $\Psi_3$      $0,018$

2. Рассчитать интенсивность ТП и построить графики зависимости интенсивности движения от скорости и количества ТС, используя возможности MS EXCEL. Привести PRINTSCREEN расчетов.

$$I = \frac{mN}{l} V \quad (1)$$

где  $m$  – масса автомобиля, кг

$l$  – длина участка дороги, км

$N$  – количество автомобилей на заданном участке дороги

$V$  – средняя скорость автомобилей, км/ч.

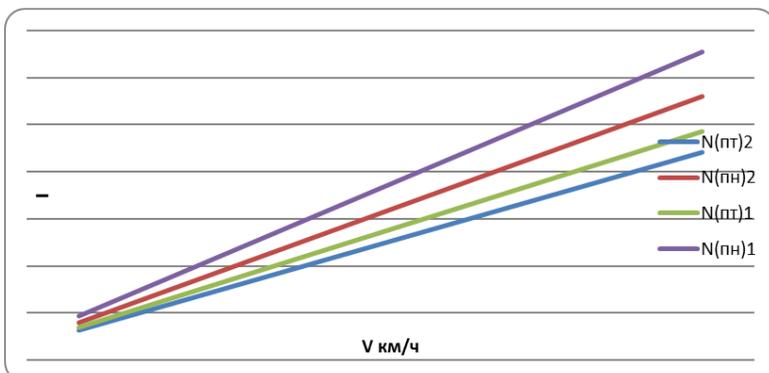


Рисунок 3. Зависимость интенсивности движения ТП от скорости

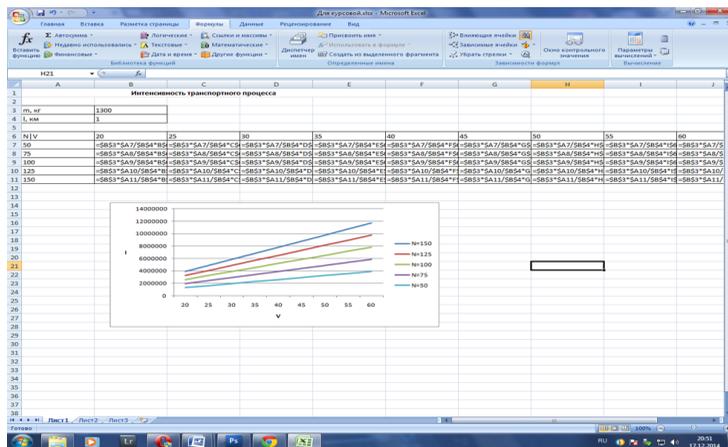


Рисунок 4. Расчет зависимости интенсивности ТП в MS

## Моделирование транспортных процессов

3. Рассчитать сопротивление движению ТП и построить графики зависимостей сопротивления движению от скорости при различных погодных условиях на спуске и подъеме, используя возможности MS EXCEL. Привести PRINTSCREEN расчетов.

Сопротивление движению транспортного потока

$$R = \frac{g(\Psi \pm i)l}{qV} \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения

$\Psi$  – коэффициент сцепления

$i$  –  $\cos(\alpha)$

$\alpha$  – угол уклона дороги

$l$  – длина участка, км

$q$  – количество автомобилей на заданном участке

$V$  – средняя скорость автомобилей, км/ч.

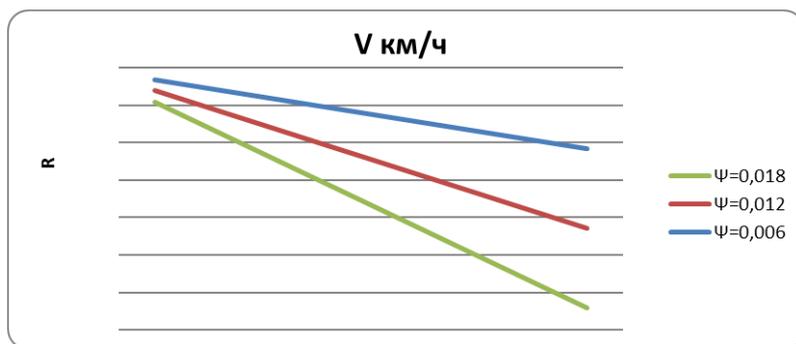


Рисунок 5. Зависимость сопротивления движению ТП от скорости на спуске при  $\alpha = 30^\circ$ ,  $q = 79$  для различных погодных условий

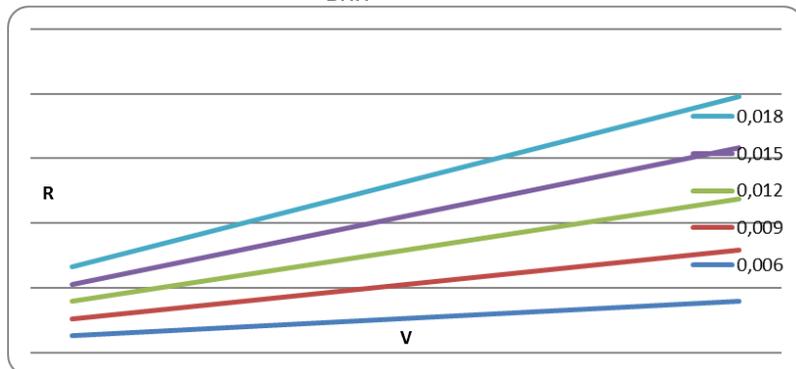


Рисунок 6. Зависимость сопротивления движения ТП от ско-

## Моделирование транспортных процессов

рости на подъеме  $3^0$ , при  $q=150$

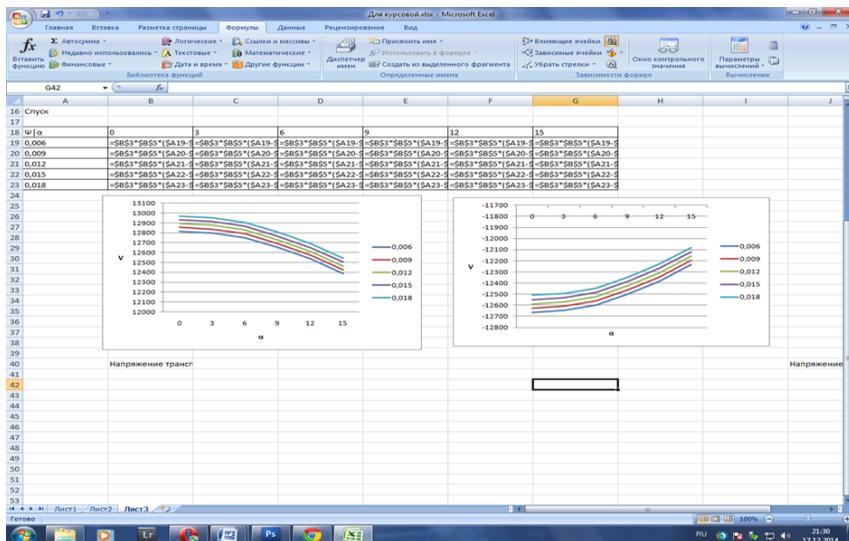


Рисунок 7. Расчет зависимости сопротивления ТП в MS Excel

4. Рассчитать напряжение транспортного потока и построить графики зависимостей интенсивности движения от скорости и количества ТС, используя возможности MS EXCEL. Привести PRINTSCREEN расчетов.

Напряжение транспортного потока

$$V = mg(\Psi \pm i)l \quad (3)$$

где  $m$  – масса автомобиля, кг  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>  
 $i$  –  $\cos(\alpha)$ ,  $\alpha$  – угол уклона дороги  
 $l$  – длина заданного участка.



## Моделирование транспортных процессов

Название курсовой работы, Ф.И.О. студента, номер группы, название выбранного участка.

1. Краткий обзор существующих методов моделирования.
2. Цели и задачи работы.
3. Исходные данные (матрица корреспонденций).
4. Основные сведения: о методе решения, сведения о выбранном участке трассы и исходных данных натурных измерений.
5. Последовательность и результаты расчетов.
6. Таблицы, графики, printscreen расчетов зависимостей основных транспортных характеристик от исходных данных.
7. Выводы.
8. Список использованной литературы.

### **Контрольные вопросы**

1. Суть метода электродинамического моделирования.
2. Достоинства метода электродинамического моделирования.
3. Работа с формулами и графиками в электронных таблицах.
4. Охарактеризовать изменения основных характеристик транспортных потоков в зависимости от погодных условий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швецов В.И. Методы моделирования. //Автоматика и Телемеханика. -2003. № 11.В.А. Бесекинский, Е.П. Попов «Теория автоматического управления», СПб, Изд-во «Профессия», 2003. -752 с.
2. Кущенко С. В. Повышение эффективности организации движения на основе моделирования транспортных потоков: Дис. канд. техн. наук. Юго-Зап. гос. университет, Курск, 2012.
3. Гальченко Г.А., Дроздова О.Н., Мищенко Д.А. Применение метода электродинамического моделирования к расчету основных характеристик транспортных потоков. //Материалы форума Безопасность, дорога, дети – 2015, стр.141-145.