

ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



Шинкарев Александр Андреевич

**МЕТОДЫ И МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТА
ТА В КРУПНЫХ ГОРОДАХ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ УПРЕЖДАЮЩЕГО
РАЗВИТИЯ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ**

Специальность 05.13.10 – Управление в социальных и экономических
системах

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Логиновский Олег Витальевич

Челябинск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТА В ГОРОДАХ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМИ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ	10
1.1 Подходы к управлению и организации движения транспорта и развитию улично-дорожной сети городов в исторической ретроспективе	10
1.2 Системы управления движением транспорта и современные средства и методы повышения их эффективности	23
1.3 Развитие методов моделирования городских транспортных потоков.....	33
1.4 Особенности применения систем управления движением транспорта в средних и крупных городах	47
1.5 Выводы по Главе 1	51
ГЛАВА 2. ФОРМИРОВАНИЕ АДЕКВАТНЫХ СОВРЕМЕННЫМ ПОТРЕБНОСТЯМ КРУПНЫХ ГОРОДОВ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ И ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТА.....	54
2.1 Обоснование актуального подхода к управлению и организации движения транспортных потоков в городских условиях.....	54
2.2 Актуальность использования семейства моделей транспортных потоков на основе клеточного автомата для средних и крупных городов	57
2.3 Унификация представления моделей транспортных потоков на основе клеточного автомата	58
2.4 Четырехступенчатое унифицированное представление моделей транспортных потоков на основе клеточного автомата	69
2.5 Мотивации смены полосы движения	72
2.6 Однополосная однонаправленная модель передвижения.....	85
2.7 Моделирование работы перекрестка.....	91
2.8 Объединение моделей в единую систему для создания топологий.....	92
2.9 Выводы по Главе 2	93

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТА И РАЗВИТИЯ УДС ГОРОДОВ. РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ	95
3.1 Оценка результатов работы моделей передвижения семейства клеточных автоматов.....	95
3.2 Анализ соответствия разработанной однополосной однонаправленной модели передвижения фундаментальным диаграммам.....	99
3.3 Методика создания системы управления движением транспорта и развития УДС городов	104
3.4 Применение разработанных научных положений, методов и моделей на практике.....	113
3.5 Выводы по Главе 3	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ	121
ЛИТЕРАТУРА	123
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Схема организации движения пересечения ул. Труда и ул. Энгельса	136
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Листинг фрагмента программной реализации	138
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Документы внедрения.....	145

ВВЕДЕНИЕ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертационной работе изложены результаты исследования повышения эффективности управления движением транспортных потоков в средних и крупных городах за счет средств математического моделирования на основе теории клеточных автоматов. Научные разработки диссертации базируются на научных трудах таких известных ученых и специалистов, как Д.Е. Вольф, К.Ф. Даганзо, Д.Ю. Долгушин, Б.С. Кернер, С.Л. Кленов, М.Д. Лайтхилл, О.В. Логиновский, К. Нагель, Г.Ф. Ньюэлл, В.В. Семенов, Д.Б. Уизем, М. Фаулер, М. Шрекенберг.

Актуальность темы. Увеличение количества транспортных средств, несмотря на спад рынка продажи автомобилей на фоне нового глобального экономического кризиса, ведет к постепенному исчерпанию ресурсов улично-дорожных сетей (УДС) городов. В связи с этим образование заторов на дорогах становится серьезной проблемой, по причине которой снижается качество транспортных услуг, падает производительность труда, а также растет уровень загрязнения окружающей среды.

Для решения задачи повышения пропускной способности УДС города можно выделить два основных подхода: внесение инфраструктурных изменений и регулирование дорожного движения. Первый вариант предполагает большие капиталовложения и, как результат, не всегда применим, в частности, для средних и крупных городов, чей бюджет ограничен, к тому же, время кардинальных решений еще не пришло. В ситуации, когда внесение инфраструктурных изменений в УДС необходимо, встает задача адекватного развития сложившейся дорожно-транспортной инфраструктуры города. Когда внесение инфраструктурных изменений преждевременно, т.е. еще не получен максимальный эффект от средств регулирования дорожного движения в сложившейся УДС, то управление движением транспорта можно осуществлять как с помощью АСУДД, так и используя математические модели транспортных потоков. Внедрение первого решения, опять же, требует значительных материальных затрат и подходит для крупных и крупнейших городов, где необходимо сложное комплексное моделирование и управ-

ление. Для решения же задач средних и крупных городов, не обладающих достаточным бюджетом, а также средствами автоматического сбора информации о дорожных условиях, должны применяться достаточно гибкие математические модели транспортных потоков, а также разработанное на их основе программное обеспечение. Однако какое бы решение не использовалось для увеличения пропускной способности УДС городов, чтобы предотвратить ошибочные мероприятия по изменению дорожно-транспортной инфраструктуры, задача развития УДС города всегда должна быть основополагающей.

Указанные соображения определили цель и задачи диссертационного исследования.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью работы является разработка методов и моделей управления движением транспортных потоков в больших и крупных городах, позволяющих связать вопросы управления движением транспорта с обоснованным развитием УДС городов.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Осуществить анализ различных подходов, методов и моделей, используемых для регулирования дорожного движения и развития УДС городов, а также оценить их адекватность и применимость в решении задач повышения пропускной способности и скорости сообщения УДС средних и крупных городов.

2. Разработать новые математические модели транспортного потока на основе теории клеточных автоматов (ТКА), способные адекватно отображать основные характеристики транспортного потока на микро- и макроуровнях.

3. Разработать унифицированный язык представления моделей рассматриваемой группы на примерах фундаментальных и разработанных в ходе диссертационного исследования моделей.

4. Сформировать комплекс методических положений для регулирования работы УДС городов на основе результатов моделирования, полученных с помощью разработанных в ходе диссертационного исследования моделей и программного обеспечения, а также рекомендаций по их практическому использованию.

Объектом исследования являются УДС крупных, больших и средних городов и автотранспортный поток.

Предметом исследования являются методы, модели и системы управления дорожным движением и развития УДС городов.

Методы исследования. Теоретической и методологической основой диссертационного исследования являются современные методы теории управления, теории транспортных потоков, исследования операций, рефакторинг и др.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Выполнении анализа различных методов, моделей и систем управления движением транспорта в городах (показана целесообразность решения вопросов регулирования движения транспорта совместно с развитием УДС городов).

2. В дополнении широко используемой на практике группы математических моделей транспортного потока на основе ТКА за счет создания математических моделей смены полосы движения, классификации мотиваций смены полосы движения, передвижения, унифицированного представления моделей этой группы и метода их рефакторинга.

3. Разработке нового подхода по использованию средств имитационного моделирования при решении задачи эффективного развития УДС городов.

4. Формировании методики оптимизации работы части УДС для средних и крупных городов, базирующихся на разработанных в диссертации методах, математических моделях и программном обеспечении.

Практическое значение результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Дополнены математические модели транспортного потока на основе ТКА, позволяющие строить на своей основе достаточно гибкие инструменты, которые дают возможность повышения эффективности управления движением транспорта с учетом мероприятий по развитию УДС.

2. Научные положения и результаты диссертационного исследования обеспечивают взаимосвязь вопросов регулирования движения транспорта на УДС с ее своевременным и проактивным развитием.

3. Разработанные положения по созданию и использованию общего языка представления моделей рассматриваемой группы позволяют значительно снизить порог вхождения для специалистов и разработчиков в области моделирования транспортных потоков и управления движением.

Акты рассмотрения и внедрения научных положений и разработок диссертации приведены в приложении 3.

Апробация работы. Основные научные положения и результаты диссертационной работы прошли апробацию на следующих научно-практических конференциях, форумах и семинарах:

1. четвертом всероссийском научно-практическом семинаре «Управление в социальных и экономических системах» (Челябинск, 2014)

2. XXXVII научной конференции International Research Journal (Екатеринбург, 2015);

3. IX Международной научно-практической конференции «Научное творчество XXI века» (Красноярск, 2015);

4. The 4th International Conference on Analysis of Images, Social Networks, and Texts (Екатеринбург, 2015)

5. форуме «Информационное общество-2015: вызовы и задачи» (Челябинск, 2015);

6. 1th International Workshop on Technologies of Digital Signal Processing and Storing (Уфа, 2015);

7. восьмой научно-практической конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ (Челябинск, 2016);

8. международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (Челябинск, 2016);

9. LIV научной конференции International Research Journal (Екатеринбург, 2016).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 13 научных трудов, из них 7 в реферируемых печатных изданиях, утвержденных ВАК, и 6 прочих публикаций в научных журналах и сборниках трудов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения; трёх глав; заключения, содержащего основные выводы и результаты исследования; списка литературы и приложений, содержащих пример сведений о схеме организации движения на одном из перекрёстков г. Челябинска, листинг фрагмента программной реализации моделей, а также сведения о внедрении основных научных положений и разработок автора в практику. Общий объем работы составляет 150 страниц, в том числе 15 рисунков. Список литературы содержит 114 наименований.

Диссертационное исследование соответствует следующим областям исследования паспорта специальности 05.13.10:

2. Разработка методов формализации и постановка задач управления в социальных и экономических системах.

4. Разработка методов и алгоритмов решения задач управления и принятия решений в социальных и экономических системах.

5. Разработка специального математического и программного обеспечения систем управления и механизмов принятия решений в социальных и экономических системах.

9. Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации экономических и социальных систем.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа подходов, математических моделей и методов повышения эффективности работы УДС городов.

2. Математическая модель мотиваций смены полосы движения для моделей транспортного потока на основе теории клеточных автоматов.

3. Математическая модель передвижения для однонаправленной однополосной дороги с шагом адаптивного торможения на основе теории клеточных автоматов.

4. Четырехступенчатое унифицированное представление математических моделей транспортного потока на основе теории клеточных автоматов, а также метод их рефакторинга для получения этого представления.

5. Методические положения по созданию систем управления движением транспорта, а также развитию УДС городов на основе разработанных в диссертации методов и моделей и результаты их практического использования.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТА В ГОРОДАХ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМИ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ

1.1 Подходы к управлению и организации движения транспорта и развитию улично-дорожной сети городов в исторической ретроспективе.

Управление и организация дорожного движения — это отрасль научно-практической деятельности, история развития которой насчитывает уже более 60 лет активных исследований (первый прообраз светофора появился еще раньше — в конце 19 века). Можно сказать, что все начиналось с регулировщика и ручного светофора, тогда как на данный момент мы имеем дело с интеллектуальными транспортными системами и «умными» городами. Помимо невероятного прогресса, который был достигнут в данной сфере научно-практической деятельности более чем за век развития подходов к управлению и организации движения, ученые и инженеры постоянно сталкивались с проблемой непрекращающегося роста уровня автомобилизации населения городов. В частности, в России в 1970-х годах количество автомобилей на 1000 человек населения составляло 5,5, в то время как в 2014 году уже 317 [1]. Постоянный рост количества автомобилей на душу населения нивелирует достижения практики управления дорожным движением, что, в свою очередь, подталкивает исследователей к продолжению активной работы над усложнением и совершенствованием методов борьбы с пробками, загрязнением воздуха, ухудшающейся ситуацией с безопасностью на дорогах, вопросами стимулирования перехода от личного транспорта к общественному и т. д.

На фоне такого спектра задач и проблем, которые стоят перед современным развивающимся городом, прорабатываются и внедряются концепции умного города и интеллектуальных транспортных систем, которые позволяют комплексно взглянуть на управление и организацию дорожного движения.

Наряду с логистическими путями управления дорожным движением также развивается и испытывается такой уже привычный для Европы подход, как бес-

светофорная организация дорожного движения, который в нашей стране пока представить довольно сложно, в том числе из-за того, что воплощение его в жизнь для крупных городов с уже сложившейся архитектурой улично-дорожной сети (УДС) трудно осуществимо, не только потому, что зачастую требует больших материальных и временных затрат, но и по причине необходимости определенной политической воли для реализации столь кардинальных решений.

В настоящее время теория и практика управления и организации движения транспорта находятся на довольно высоком уровне развития. Проработаны математические основания и теории, позволяющие имитировать транспортные потоки и проводить анализ получаемых результатов. Внедрены многие математические модели и частично решены задачи прогнозирования ситуации на дороге, расчета предельной пропускной способности заданного участка дорожной сети и т.д. Однако решению задачи развития УДС городов уделяется намного меньше внимания, чем необходимо. Такая постановка вопроса о приоритете управления (регулирования) над развитием губительным образом сказывается на качестве работы дорожно-транспортной инфраструктуры вследствие принятия решений по регулированию работы сложившейся топологии УДС и среднесрочному и долгосрочному ее развитию, основывающихся на не самых оптимальных концепциях сиюминутного решения локальных задач повышения пропускной способности УДС.

Даже если не говорить о решении стратегически важной задачи развития УДС городов, то ситуация такова, что сколь бы ни был высок уровень развития и разнообразия методов организации и управления дорожным движением, но во многих крупных городах вопросы оптимизации дорожного движения до сих пор решаются без использования новейших разработок в сфере регулирования работы УДС. Отчасти из-за высоких цен на подобные программные и программно-аппаратные комплексы, и также потому, что внедрение подобного рода систем, в свою очередь, требует больших временных и финансовых затрат, что не всегда возможно при дефиците бюджета, который сейчас имеет место быть. Хотя стоит отметить, что существует целый ряд бесплатных и даже полностью открытых инструментов, которые могут быть использованы в подобного рода условиях, но не

применяются, возможно, по причине недостаточной заинтересованности ответственных подразделений или же из-за недостатка квалифицированных кадров.

Для того чтобы более полно понимать путь, который был пройден, и который еще предстоит пройти современной науке в сфере управления и организации движения транспорта, рассмотрим основные вехи в развитии средств регулирования работы УДС городов [14].

1.1.1 Светофорное регулирование дорожного движения

Первый прибор, регулирующий движение, появился в 1868 г. в Англии, его изобретатель — Д.П. Найт был специалистом по железнодорожным семафорам. Светофор управлялся вручную и имел два положения: первое разрешало движение с осторожностью, а второе запрещало движение. Со временем семафорные крылья заменили газовыми трубками, но после происшествия 1896 года, когда газовый фонарь светофора взорвался, ранив управляющего светофором полицейского, о светофорном регулировании забыли почти на пятьдесят лет.

Первая система светофоров, способная к автоматическому переключению без непосредственного участия человека, была разработана и запатентована в 1910 году Э. Сиррином. Его светофор использовал надписи Proceed и Stop, которые не имели подсветки.

Первым, кто изобрел электрический светофор, считается Л. Вайр. В 1912 году он разработал, но не запатентовал, светофор с двумя круглыми красным и зеленым электрическими сигналами. 5 августа 1914 года Американская светофорная компания на перекрестке в Кливленде установила четыре электрических светофора конструкции Д. Хога. У них был красный и зеленый сигналы, а при переключении издавался звуковой сигнал. Система управлялась полицейскими, которые сидели в стеклянной будке на перекрестке.

В 1920 году в Детройте были установлены трехцветные светофоры, использующие желтый сигнал, чьими авторами были У. Поттс и Д.Ф. Харрис.

В Европе аналогичные светофоры впервые были установлены в 1922 году, а в Англии в 1927 году.

В СССР первый светофор установили в 1930 году в Ленинграде. В Москве первый светофор появился 30 декабря того же года [17].

До 1956 года на регулируемых перекрестках Москвы стояли электрические светофоры, требующие для переключения сигналов непосредственного участия милиционеров.

Во второй половине пятидесятых годов в Москве появились первые автоматические светофоры, которые работали в соответствии с заданной программой. А вскоре на базе этих умных светофоров нашими инженерами была создана первая система координированного управления — центральная автоматическая светофорная станция.

В середине девяностых годов были изобретены зеленые светодиодные светофоры с достаточной яркостью и чистотой цвета, и начались эксперименты со светодиодными светофорами [3].

1.1.2 АСУДД и светофоры

В тот момент, когда города получили в свое распоряжение регулируемые светофорами перекрестки, автоматически встала задача повышения эффективности их работы, т.е. повышения пропускной способности УДС. И здесь одним из современных и зачастую слишком часто используемых вариантов решения подобной задачи является внедрение автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУДД).

В современных АСУДД широко используется информация о транспортных потоках, чьим источником являются видеокamеры, входящие в состав подсистем видеоконтроля. Получаемые от них данные позволяют организовать оптимальное управление транспортными потоками, скоординировать работу ключевых транспортных узлов города, проводить анализ различных закономерностей при определенных управляющих воздействиях. Преимуществом систем видеоконтроля является сочетание числовой и визуальной информации, которая радикально отличает их от других систем наблюдения.

Системы видеоконтроля, ориентированные на транспорт, предоставляют данные трех типов [3]:

1. Информация о трафике для статистической обработки:

- а) общее число обнаруженных автомобилей;
- б) скорость;
- в) ускорение транспортного потока;
- г) плотность потока;
- д) занятость полос движения;
- е) классификация автомобилей.

2. Информация о происшествиях на дороге:

- а) высокая скорость, плотность потока или занятость полос;
- б) наличие заторов или движения по встречной полосе;
- в) остановившиеся или медленно движущиеся автомобили;
- г) наличие на дороге подозрительных предметов.

3. Информация о наличии/отсутствии автомобилей:

- а) наличие приближающихся автомобилей;
- б) наличие автомобилей, остановившихся на перекрестке;
- в) число автомобилей, проехавших через зоны обнаружения;
- г) измерение длины очереди.

По опыту зарубежных стран последний тип информации широко применяется в системах управления светофорами [3]. Возможно, что в нашей же стране на данный момент наиболее комплексно эту информацию использует АСУДД города Сочи, которая является частью Олимпийского наследия.

Если же нет необходимости в визуальном подтверждении дорожной ситуации, то можно обойтись и куда более дешевыми средствами получения информации об интенсивности дорожного движения и плотности потока. Ведь на основании именно этих данных производятся основные расчеты параметров дорожно-транспортной сети, а необходимости в дополнительной информации, которую предоставляют видеокамеры, может и не быть. К тому же, программное обеспечение, определяющее интенсивность и плотность, является довольно дорогим, а в

случае самостоятельного производства требует программистов высокой квалификации.

В любом случае, данные, получаемые от систем анализа потока, попадают в математическую модель, которая на основе этой информации делает прогноз ситуации в будущем и позволяет получить дополнительный отчет о состоянии дорожной ситуации. Также зачастую модель подстраивает параметры средств регулирования дорожного движения, чтобы избежать пробок, организовать «зеленую волну» и т.д.

Решение задач функционирования (управления движением) и развития УДС города производится в настоящее время дифференцированно. Вначале разрабатываются проекты развития или реконструкции УДС, а уже затем проектируются системы (методы) управления движением транспорта и пешеходов на ней.

В качестве наиболее ярких примеров построения систем управления дорожным движением и развития УДС можно рассмотреть опыт таких крупнейших городов как Нью-Йорк и Лондон.

В Нью-Йорке наиболее интересной особенностью выстраивания стратегии управления дорожным движением и развития его сложнейшей УДС является то, что муниципальные власти и департамент транспорта стремятся к тому, чтобы как можно сильнее сократить численность личного транспорта на душу населения. Подобное достижимо только в случае присутствия для жителей города качественно выстроенной сети общественного транспорта. За счет выделения огромных средств (порядка 10 млрд. дол. в 2008 году), инвестируемых в ежедневно используемый общественный транспорт, город стимулирует жителей к отказу от использования личного транспорта и переходу к общественному. Конечно же, выделение огромных средств само по себе не побудит людей к отказу от личного транспорта и удобств, которые он дает, но, что действительно мотивирует, так это инвестиции этих денег в повышение качества услуг муниципального транспорта и повышение степени его доступности и проработанности сети.

Основу системы управления УДС в Лондоне составляет принцип экономической оправданности, согласно которому правительство в последующие десять

лет будет финансировать только те проекты, реализация которых позволит увеличить экономическую эффективность расходования денежных средств на объекты транспортной инфраструктуры [6]. Таким образом, подразделениям, ответственным за управление УДС, поручено создание методов оценки качества тех или иных экспертных оценок, необходимых мероприятий по повышению качества работы дорожной инфраструктуры города. С одной стороны, этот подход, направленный на повышение прибыльности вкладываемых денежных средств, может показаться излишне меркантильным, но в купе с достижением цели повышения качества предоставляемых городом транспортных услуг он является одним из наиболее оправданных и целесообразных подходов не только управления дорожным движением, но и развития УДС городов.

Таким образом, Нью-Йорк и Лондон вполне успешно решают схожие задачи, но разными методами, которые в целом объединяет наличие критериев, определяющих успешность достижения целей, а также наличие стратегического видения того, каким образом в долгосрочной перспективе можно действовать проактивно по отношению к увеличивающейся нагрузке на транспортную сеть города.

В отличие от методов, используемых в Нью-Йорке и Лондоне, которые изначально направлены на упреждающее развитие УДС, АСУДД, имеющие объектом управления транспортные потоки, движущиеся по сложившейся УДС, не выдают никаких рекомендаций по целесообразному изменению ее элементов или же всей сети в целом.

Подобная практика неполного охвата АСУДД целей и задач управления дорожным движением и, в основном, развития УДС городов отчасти объясняется сложностью моделирования транспортных потоков.

Необходимость совместного решения вопросов функционирования и развития УДС связана также с тем, что стоимость современных АСУДД постоянно увеличивается, а обоснованных рекомендаций (аппарата оценки) использования АСУДД определенного типа и их сравнения с иными предложениями по организации движения (реконструкции УДС) не существует.

Таким образом, возникает потребность в определении места (условий) целесообразного применения различных моделей управления (организации) движением и АСУДД для объектов (городов) разных по величине и характеру УДС.

Следует заметить, что если в часы пик транспортные потоки достигают насыщения, то АСУДД практически не дают выигрыша в сокращении задержек транспорта на перекрестках.

Теоретически, могут быть случаи, когда никакая АСУД не предотвратит возникновения заторов, так как поток через сеть превышает ее пропускную способность.

С градостроительной точки зрения, важнейшим недостатком АСУДД в городах является то, что они проектируются на основе дескриптивного принципа, при котором решается задача только оперативного регулирования движения на заданной сети, а задача собственно управления, заключающаяся в определении рациональной структуры требуемого для нормального функционирования состояния системы, не решается, ибо объектом управления в АСУДД выбирается, как известно, транспортный поток, представляющий из себя множество дискретных элементов — автомобилей.

Любые (даже самые простые) АСУДД требуют больших капиталовложений по сравнению с использованием светофоров-автоматов с жестким режимом работы. В настоящее время существенное значение приобретает комплекс мероприятий по организации городского движения, позволяющих, в определенной степени, решить многочисленные проблемы при сравнительно малых капиталовложениях [20]. Именно такие гибкие и малозатратные методы должны быть востребованы у специалистов принципиально нового уровня, имеющих перед собой цель успешного и адекватного сложившейся ситуации развития УДС городов. Основой как сложных АСУДД, так и более простых средств управления и анализа работы дорожно-транспортной инфраструктуры выступают математические модели транспортных потоков различных семейств и направленностей. Приведем краткую историю развития основных направлений моделирования транспортных потоков, подробно этот вопрос будет рассмотрен в параграфе 1.3.

1.1.3 Методы математического моделирования транспортных потоков

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

Первостепенной задачей, послужившей развитию моделирования транспортных потоков, стал анализ пропускной способности магистралей и пересечений. В специальной литературе встречаются такие модификации понятия пропускной способности, как теоретическая, номинальная, эффективная, собственная, практическая, фактическая и другие. В настоящее время пропускная способность является важнейшим критерием оценки качества функционирования путей сообщения.

Первая макроскопическая модель, в которой движение транспортного потока рассматривалось с позиции механики сплошной среды, была предложена в 1955 году Лайтхиллом и Уиземом. Они показали, что методы описания процессов переноса в сплошных средах могут быть использованы для моделирования заторов.

Выделение математических исследований транспортных потоков в самостоятельный раздел прикладной математики впервые было осуществлено Ф. Хейтом.

В 60–70-е годы вновь возник интерес к исследованию транспортных систем. Эта заинтересованность проявилась в том числе в финансировании многочисленных контрактов, обращении к авторитетным ученым — специалистам в области математики, физики, процессов управления, таким как Нобелевский лауреат И. Пригожин, специалист по автоматическому управлению М. Атанс, автор фундаментальных работ по статистике Л. Брейман. В нашей стране движение автотранспорта активно изучалось в конце 70-х годов в связи с подготовкой к Олимпийским играм 1980 года в Москве. Результаты этих исследований неоднократно докладывались на научно-исследовательском семинаре И.И. Зверева на механико-технологическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова [18].

Одна из математических моделей организации движения транспортных потоков на улично-дорожной сети города, как на системе взаимосвязанных пере-

крестков, была предложена О.В. Логиновским в конце 70-х годов прошлого века [13].

В конце 80-х начале 90-х в США проблемы исследования транспортных систем были возведены в ранг проблем национальной безопасности. К решению этой задачи были привлечены лучшие физики и компьютерная техника Национальной исследовательской лаборатории Лос-Аламос.

В итоге в моделировании дорожного движения исторически сложилось два основных подхода — детерминистический и вероятностный (стохастический).

В основе детерминированных моделей лежит функциональная зависимость между отдельными показателями, например, скоростью и дистанцией между автомобилями в потоке. В стохастических моделях транспортный поток рассматривается как вероятностный процесс.

Все модели транспортных потоков можно разбить на три класса: модели-аналоги, модели следования за лидером и вероятностные модели [18].

В моделях-аналогах движение транспортного средства уподобляется какому-либо физическому потоку (гидро- и газодинамические модели). Этот класс моделей принято называть макроскопическими.

В моделях следования за лидером существенно предположение о наличии связи между перемещениями ведомого и головного автомобиля. По мере развития теории в моделях этой группы учитывалось время реакции водителей, исследовалось движение на многополосных дорогах, изучалась устойчивость движения. Этот класс моделей называют микроскопическими.

В вероятностных моделях транспортный поток рассматривается как результат взаимодействия транспортных средств на элементах транспортной сети. В связи с жестким характером ограничений сети и массовым характером движения в транспортном потоке складываются отчетливые закономерности формирования очередей, интервалов, загрузок по полосам дороги и т.п. Эти закономерности носят стохастический характер [18].

В последнее время в исследованиях транспортных потоков стали применять междисциплинарные математические идеи, методы и алгоритмы нелинейной

динамики [18], то есть приходит осознание того, что для эффективного моделирования транспорта необходимо совместное использование разных научных дисциплин и переход к гибридным подходам.

Наряду с автоматизированным управлением работой регулируемых перекрестков, целью которого является достижение максимальной пропускной способности узлов транспортной сети и уменьшение издержек участников дорожного движения, существует подход к организации дорожного движения на участках пересечения без использования светофоров.

1.1.4 Бессветофорная организация дорожного движения

Бессветофорное движение — концепция организации дорожного движения, основанная на том, что на некоторых видах перекрестков (Т-образный перекресток с односторонней главной дорогой и двусторонней второстепенной, Y-образный с круговым движением) для безопасного разъезда автомобилей не требуется светофор (траектории транспортных средств пересекаются исключительно во время перестроения) [19].

При подобной организации движения пешеходы пропускаются с помощью подземных переходов или вызывных светофоров, также могут использоваться надземные пешеходные мосты.

Решение вопроса организации бессветофорного движения городских дорожно-транспортных средств в двумерном пространстве в рамках действующих норм и правил упирается в обеспечение условий, при которых траектории непрерывно движущихся объектов могут пересекаться только при их перестроении. Этот способ актуален не только для строящихся и быстро развивающихся городов, но может также с успехом применяться для оптимизации дорожного движения крупных городов с уже сложившейся архитектурой УДС, где не так просто внести столь кардинальные изменения [4].

Специалисты по планированию и проектированию городских транспортных потоков в Германии, Дании и Голландии провели эксперимент под названием «Голые улицы» с введением неуправляемых улиц и перекрестков, и нашли их бо-

лее эффективными по сравнению с традиционными моделями. Как показала практика, водители тратят меньше времени на поездки, а в часы пик на дорогах реже создаются пробки. Идея проекта заключается в том, что вместо регулируемых светофоров и дорожных знаков, участники движения используют невербальный контакт друг с другом. Таким образом, не ограниченные ничем водители и пешеходы становятся более осторожными и внимательными, обостряются их чувства, просыпается внутренняя дисциплина.

Во многих развивающихся странах нерегулируемое дорожное движение — неотъемлемая часть городской жизни. В перегруженных транспортных потоках Бали и Индонезии водители транспортных средств и пешеходы игнорируют знаки и светофоры, и, тем не менее, вполне безопасно передвигаются, полагаясь на негласные правила и свое чутье. Конечно, подобная система чаще всего работает в местах с медленным трафиком и обилием пешеходов [3].

По данным проведенных исследований бессветофорная организация движения действительно может оказаться более эффективной по сравнению с традиционными моделями. Но подобный подход может быть внедрен лишь в городах, где органы местного самоуправления имеют достаточно сильную политическую волю, ведь зачастую принятие модели такого рода требует больших капиталовложений, а также длительной и зачастую болезненной реконструкции существующей дорожной инфраструктуры.

Теперь для того чтобы понять, каким путем при построении УДС шли СССР и современная Россия, рассмотрим основные этапы развития дорожно-транспортной инфраструктуры этих государств. Также проследим мотивировку общих идей и направлений развития УДС городов, которые были выбраны во время существования СССР, того, какой смысл они имели тогда и почему в целом были кардинально пересмотрены после распада Советского Союза.

1.1.5 Развитие дорожно-транспортной инфраструктуры в СССР и России

Архитектура и градостроительство эпохи развитого социализма находились под влиянием такого широко распространенного явления, как чиновничий волон-

таризм, когда партийные руководители страны, республик и областей — люди, как правило, очень плохо разбирающиеся в архитектуре и градостроительстве, фактически диктовали к исполнению свои дилетантские представления при утверждении самых серьезных вопросов от градостроительной политики при разработке и утверждении генпланов городов до конкретных вопросов расположения и архитектурно-планировочных решений объектов строительства. С этим явлением прошлых лет связано огромное количество градостроительных ошибок и просчетов, которые, безусловно, нанесли большой вред градостроительству и которые не могут, к сожалению, быть исправлены в течение многих десятков лет.

Градостроительное проектирование и строительная практика тех лет не отвечали требованиям интенсификации ресурсов и критериям энергосбережения. Экстенсивные методы землепользования и развития населенных пунктов привели к потере компактности плана в крупных городах, значительной удаленности новых районов от центра, ухудшению расселения населения, увеличению протяженности всех видов инженерных коммуникаций (с неизбежным при этом ростом энергопотерь), большим затратам на дорожно-транспортные сети и сооружения, расползанию систем обслуживания и т.д. [15]

В результате распада СССР рыночные отношения сделали неэффективным путь экстенсивного развития городов страны. В интересы заказчиков перестало входить расширение занимаемого городом пространства, на первый план вышло решение задачи снижения стоимости строительства, что и подтолкнуло к реконструкции освоенных районов городов, что, в свою очередь, способствовало улучшению использования городских земель, компактности городских планов, транспортной и инженерной инфраструктуры, учреждений торговли и социально-бытового обслуживания.

Также возросла нагрузка на улично-дорожные сети городов в связи с увеличившимся уровнем автомобилизации населения.

Сейчас одной из основных проблем градостроительства является отсутствие современной научной парадигмы в теории градостроительства, которое приводит к принятию не самых эффективных архитектурно-планировочных решений.

Задачи управления в градостроительстве давно кардинально изменились, а система анализа и выработки управленческих решений осталась практически прежней, сложившиеся еще в эпоху административно-командной системы управления. Что, безусловно, не способствует переходу на качественно иной уровень работы дорожно-транспортной инфраструктуры страны, как того требует Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года [21].

Для того чтобы понять, на каком этапе сегодня находится область управления дорожным движением в России и мире, рассмотрим используемые системы управления движением транспорта, а также методы и подходы повышения эффективности работы УДС городов и перехода к некоторой интегрированной среде, которая бы объединяла не только дорожно-транспортную инфраструктуру, но и все ТС на ней.

1.2 Системы управления движением транспорта и современные средства и методы повышения их эффективности

1.2.1 Российские АСУДД

Для начала рассмотрим АСУДД, разрабатываемые на территории нашей страны.

В качестве АСУДД, разрабатываемых в России, можно привести в пример такие системы как «Спектр», «Магистраль», «КС», «АСУДД-Приоритет» и т.д. Основными функциями которых, как заявляют производители, являются:

- Адаптивное управление светофорами и другими элементами регулирования дорожного движения.
- Сбор, хранение и визуализация данных, собираемых с различных датчиков, подключенных к системе.
- Информирование водителей об изменяющейся ситуации на дороге и достижение таким образом равномерного распределения нагрузки на УДС.

Проанализировав основные направления работы и цели, которые помогают достигать системы подобного рода, можно легко заметить, что они не отталкиваются от решения задачи развития УДС, а, напротив, в основном работают только в рамках сложившейся дорожно-транспортной сети и предоставляют лишь средства локального регулирования.

Безусловно, системы такого рода подчас необходимы, но все же для удовлетворения возрастающих потребностей общества стратегической задачей при внедрении подобных систем и других решений, направленных на регулирование дорожного движения с целью повышения эффективности работы УДС, должна являться задача развития транспортной сети города.

Кроме того, стоимость создания и эксплуатации таких систем очень велика и не всегда оправдана, особенно для городов, не обладающих достаточными средствами автоматического слежения за дорожной ситуацией. Однако системы подобного рода все же могут быть успешно использованы, но зачастую только в ограниченный временной промежуток.

В качестве примера комплексного решения текущих и будущих проблем управления дорожным движением можно рассмотреть бесценный опыт проведения Олимпийских игр в Сочи.

В Сочи была разработана и внедрена уникальная Комплексная схема организации движения (КСОД). КСОД охватывает широкий спектр задач по совершенствованию и повышению безопасности дорожного движения и направлена на получение программы развития УДС города в долгосрочной перспективе. В рамках подготовки и проведения зимних Олимпийских игр 2014 года, используя моделирование транспорта, была проанализирована сложившаяся дорожная ситуация, получены основные параметры и просчитаны желаемые предельные показатели пропускной способности, достижимые для УДС города при внедрении комплекса взаимосвязанных мер. По сути своей, КСОД является стратегическим видением и одновременно практическим воплощением планов по развитию УДС. Также для нужд Олимпийских игр и города в целом была разработана и внедрена АСУДД, которая совместно с КСОД решает типичный для систем подобного рода

набор задач. Интересным аспектом этой АСУДД является ее ориентированность на нужды пассажирского транспорта и адаптивное изменение параметров системы в режиме, приближенном к режиму реального времени для приоритетного пропуска муниципального транспорта.

1.2.2 Модели транспортного потока и программные пакеты на их основе

Для оценки и анализа работы транспортной сети города помимо АСУДД также применяются более дешевые и гибкие средства, такие как различные математические модели и программные продукты на их основе. Основным источником материалов для представленного параграфа послужили результаты исследования, изложенного в работе [11].

Можно выделить два основных вида математических моделей, применяемых для анализа и оптимизации работы транспортных сетей и потоков:

1. прогнозные модели объема транспортных корреспонденций между потокопорождающими объектами;
2. модели динамики транспортных потоков.

В работе [11] также в качестве третьего класса приводится класс оптимизационных моделей.

Прогнозные модели в своей концепции опираются на граф связей объектов дорожной инфраструктуры, матрицы корреспонденции, итеративное повторение шагов модели.

Модели динамики транспортных потоков делятся на следующие семейства:

- макроскопические модели;
- микроскопические модели;
- мезоскопические модели;
- гидродинамические модели второго порядка.

Подробный анализ представленных семейств можно найти в работах [18, 107].

В отличие от АСУДД программные средства моделирования работы топологии УДС, в основном, не требуют больших капиталовложений. Однако резуль-

таты моделирования, которые они предоставляют после некоторой калибровки, зачастую являются довольно адекватными и позволяют оценить характеристики транспортных развязок и магистралей.

На сегодняшний день существуют такие коммерческие долгострои, как, например, пакет CORSIM, который разрабатывается уже более 30 лет. В качестве же свободно распространяемых пакетов, чей исходный код доступен для анализа и модификации, можно привести, например, SUMO — этот пакет разрабатывается в Германии и предназначен для моделирования широкополосных магистралей.

Пакеты на основе мезоскопических и макроскопических моделей за счет возможностей, которые они предоставляют, и уровня детализации, на котором работают, позволяют решать такие задачи, как планирование транспортной инфраструктуры, графическая обработка сети, анализ и оценка транспортной сети, прогноз эффекта запланированных мероприятий [10]. Но, даже несмотря на то, что они не работают на уровне каждого ТС, все же часто используются как базовые модели при создании платформ для транспортных информационных систем.

Многие пакеты, поддерживающие микромоделирование, позволяют создавать транспортные схемы и накладывать их на карты (такие карты служат фоновыми изображениями, на которые наносятся транспортные сети городов). Особо следует выделить в этой области возможности пакета Aimsun. В большинстве пакетов для микромоделирования существует возможность устанавливать максимальную и минимальную скорость движения, типы дорожных участков, их пропускную способность и т.д. [10] Неоспоримым преимуществом микромоделей является их работа на уровне каждого ТС, что позволяет решать куда более широкий круг задач, нежели у моделей, рассматривающих транспортный поток, как нечто неделимое.

На основании обзора программных и математических инструментов транспортного моделирования можно увидеть, насколько, с одной стороны, разнообразны и развиты программные средства и математические модели, применяемые для анализа транспортных сетей, и, в то же время, насколько далека эта область исследований от завершения, насколько она нуждается в координации усилий

разных школ «теоретиков», «практиков» и «управленцев», решающих транспортные проблемы крупных городов.

При исследовании столь сложных явлений, как транспортные потоки, следует искать возможности эффективного синтеза разнообразных математических подходов, руководствуясь тем, насколько эти подходы или их комбинации позволяют продвинуться в решении наиболее актуальных теоретических и практических задач транспортного моделирования [10].

В конечном итоге, какой бы подход для управления и оптимизации работы сложившейся УДС города не использовался, будь то сложная АСУДД, либо же гибкая и легковесная имитационная модель, наиболее прозорливым будет вариант, отталкивающийся от цели долгосрочного развития дорожной сети города. Ведь именно вектор, направленный на развитие УДС, является необходимой составляющей взвешенного стратегического плана управления дорожной инфраструктурой города.

Также важно отметить, что одних средств моделирования недостаточно для эффективного развития УДС городов, также необходима слаженная совместная работа всех заинтересованных в повышении качества транспортного сообщения города групп лиц. Ярким примером подобного рода продуктивной кооперации является внедрение аналитической системы PTV Vision VISIM в Германии. Над совершенствованием транспортной системы работают не только государственные структуры, но и частные перевозчики, учреждения общественного транспорта и внешние проектные организации. Каждая часть этой цепочки выполняет свою часть работы, что позволяет получить целостный план транспортного развития города и реализовывать его внедрение на практике на всех этапах, соблюдая баланс интересов.

1.2.3 Способы информирования участников дорожного движения

Наряду с методами организации архитектуры дорожно-транспортной сети и технологиями интеллектуального регулирования дорожного движения не последнюю роль в борьбе с основными проблемами перегруженной транспортной ин-

фраструктуры играют методы информирования участников дорожного движения о текущей ситуации на дорогах. Они позволяют водителям принимать более взвешенные решения при выборе маршрута, что в целом положительно влияет на равномерность распределения нагрузки на транспортную сеть и является одним из действенных методов повышения эффективности работы систем управления движением транспорта без существенного усложнения внутренней логики работы таких систем как АСУДД.

Информирование участников дорожного движения о дорожной ситуации вполне успешно работает во многих странах. При перегрузке основных улиц предоставляются сведения об объездных маршрутах. В том числе доступна информация о парковках, разрешенных направлениях движения, где также могут быть указаны названия районов и улиц. Передающими информацию элементами служат многопозиционные дорожные знаки, световые табло с обновляемой информацией, а также специальные видео и радиоканалы. В настоящее время к этим элементам добавляются и мобильные приложения, показывающие загрузку УДС в любое время суток. Для России такого рода сервисом является, например, «Яндекс.Пробки». Важно подчеркнуть, что это самостоятельный сервис и он не связан с муниципальными системами городов.

На данный момент уже существуют технологии, которые позволяют объединять транспортные средства в единую сеть, используя встроенные в них компьютерные чипы. Созданы специальные радары и приборы радиопредупреждения, которые помогают избежать столкновения на дороге. В процессе внедрения технологии, позволяющие блокировать запуск двигателя автомобиля, в случае если водитель находится в состоянии алкогольного или иного опьянения. Спутниковые технологии, разнообразные навигационные системы и системы определения местонахождения транспортного средства становятся обычным явлением, помогая водителю находить дорогу в незнакомом городе или вызывать помощь простым нажатием кнопки. Широкое распространение получают устройства, автоматически уведомляющие экстренные службы в случае срабатывания подушек безопасности, угоне транспортного средства и т.д.

Одна из британских компаний разработала «транспортные видеокамеры», которые должны повысить безопасность на дорогах, прежде всего за счет регулирования скорости потока транспортных средств. Новые устройства представляют собой вмонтированные в дорожное полотно светящиеся маячки, которые при помощи видеокамеры определяют скорость автомобилей, износ их покрышек и идентифицируют номерные знаки. Когда скорость приближающегося автомобиля измерена, устройство начинает работать подобно светофору — светодиоды подают автомобилистам световые сигналы от красного до зеленого.

С начала 2006 года в Японии на автомобилях появились «умные» номера, оснащенные встроенным микрочипом, запоминающим и передающим информацию о владельце, номере автомобиля, его размере и месте регистрации. Целью эксперимента является ограничение с помощью современных технологий скопления автомобилей в час пик на центральных магистралях японских городов. В перспективе владельцам автомобилей, желающим попасть в центр города в час пик, придется оплачивать въезд. Власти Японии планируют полностью автоматизировать процесс списания платы с электронного чипа, который будет установлен в каждый автомобиль [3].

В США силами правительства и компаний IBM, Chrysler и Nissan планируется внедрение светофоров, способных сообщать водителям, какой скорости им необходимо придерживаться, чтобы попасть в так называемую «зеленую волну».

Одной из проблем, которую решает организация и регулирование дорожного движения, являются пробки на дорогах.

Проблема пробок остро стоит во многих странах мира, и попытки ее разрешить многочисленны и разнообразны [7].

Во многих странах Европы и Японии созданы системы, которые следят за состоянием дорог и передают информацию об их загруженности непосредственно на приборную доску автомобиля. Располагая такими сведениями, водитель может видеть проблемные участки и предпринимать действия по их объезду.

Английская фирма IT IS экспериментирует с системой определения загруженности дороги по сигналам сотовых телефонов. Действительно, в настоящее

время практически каждый человек имеет, как минимум, один мобильный телефон. А операторы сотовой связи всегда следят за местонахождением мобильных устройств, тем самым могут предоставлять информацию по концентрации аппаратов в том или ином месте, что, в свою очередь, дает потенциальную возможность отслеживать интенсивность, плотность и другие характеристики транспортных потоков. Таким образом, решив проблему отсеивания мобильных устройств, которые принадлежат велосипедистам и пешеходам, получится система, предоставляющая вполне достоверные данные об интенсивности движения в определенных районах без необходимости оборудовать дороги дорогостоящими датчиками, которые бы определяли параметры транспортных потоков города.

В городе Редмонд (США) фирма Microsoft создала систему прогнозирования пробок. По телефону или через Интернет водитель, введя данные о поездке, получает прогноз состояния интересующих его трасс.

Указываются вероятные места пробок. Для прогноза используются как данные о состоянии загруженности дорог, поступающие в реальном времени, так и сведения, накопленные в прошлом. Учитываются также погода, календарь выходных и праздничных дней и даже массовые мероприятия. Достоверность прогнозов, которыми ежедневно пользуются более 3000 сотрудников фирмы Microsoft, достигает 75%.

Несколько групп исследователей США и Германии считают, что бороться с дорожными пробками можно на уровне отдельного автомобиля. Многие современные автомобили оборудованы системой круиз-контроля, которая позволяет поддерживать заданную скорость движения автоматически. Снабдив данную систему радаром, который следит за расстоянием до впереди едущего автомобиля, автомат получает возможность при необходимости снижать скорость автомобиля, например, если расстояние до впереди едущего транспортного средства опасно для данной скорости. Подсчитано, что если бы все машины на дорогах США были оборудованы этим так называемым адаптивным, или активным круиз-контролем, число ежегодных столкновений на дорогах страны уменьшилось бы на 12000.

У адаптивного круиз-контроля есть дополнительный эффект: он делает движение потока машин более плавным. Там, где человек резко останавливает машину, автомат снижает скорость постепенно. Компьютерное моделирование показало, что достаточно снабдить адаптивным круиз-контролем 20% транспортных средств, чтобы полностью устранить некоторые типы заторов.

В борьбе с пробками, особенно в крупных городах, применяют различные методы. Наиболее характерными из которых являются следующие:

- Система Carpool, при которой парк автомобилей находится в совместном пользовании сразу нескольких водителей и применяется в различных формах.
- Система управления парковками (платные парковки, ограничения на парковку).
- Развитие сети городского общественного транспорта: строятся новые станции метрополитена, увеличивается протяженность маршрутов наземного общественного транспорта.
- Автоматизированная система управления дорожным движением, которая регулирует работу светофоров, имеющие автоматически переключающиеся программы в зависимости от времени суток.
- Платные дороги, тоннели.
- Платный въезд большегрузного транспорта.
- Информационные табло, на которых размещена информация о ближайших заторах, авариях, ремонтах.
- Новые многоэтажные развязки, разгрузочные экспресс-шоссе.
- Навигационные устройства, на которых через спутник отражается информация о ситуации на дорогах, и предлагаются оптимальные варианты движения к цели.
- Строительство скоростных магистралей.
- Для автобусов и легковых автомобилей с загрузкой более одного человека выделяют особые полосы движения, отделенные разметкой или невы-

сокими бордюрами, позволяющие объезжать дорожные заторы в часы пик.

Существенно изменить дорожную ситуацию можно на основе применения современных методов организации движения транспорта и пешеходов, позволяющих повысить эффективность функционирования дорожно-транспортной системы. Качественная организация движения транспортных средств на улицах и дорогах позволяет, во многих случаях, создать необходимые условия для бесперебойной перевозки пассажиров и грузов.

Ограничение доступа транспортных средств на определенные территории города, введение жилых и пешеходных зон, запрет или ограничение движения грузового транспорта, зональные ограничения скорости, реверсивное регулирование движения, адаптивное сетевое управление транспортными и пешеходными потоками с использованием АСУДД, информационное обеспечение участников движения — все эти методы и технические средства организации дорожного движения, применяемые на практике, недостаточно гибко реагируют на состояние дорожного движения.

Внедрение автоматизированных систем управления дорожным движением позволяет сократить задержки в движении транспорта на 20–25%, сократить время поездки на 10–15% и уменьшить вредные выбросы на 5–10%. Интересным решением оптимизации движения транспортных потоков является внедрение новых современных методов управления дорожным движением, использующих быстро развивающуюся сферу информационных технологий, «интернета вещей» и базирующихся на концепции тотальной интеграции.

В целом всю стратегию местных властей по борьбе с чрезмерной загруженностью дорог можно разделить на три взаимосвязанных блока. Во-первых, это меры, которые призваны стимулировать отказ от пользования личными автомобилями в пользу общественного транспорта. Во-вторых, создание эффективной инфраструктуры дорог для быстрого передвижения тех, кто пренебрег советами и сел за руль личного авто. В-третьих, разработка системы информирования о ситуации на дорогах, которая была бы доступна каждому автомобилисту и позволяла

бы ему прокладывать свой маршрут наиболее оптимальным и удобным для него образом, избегая пробок [5].

Направление объединения автомобилей в общую взаимосвязанную сеть можно рассматривать как частный случай реализации куда более глобальной и актуальной сейчас идеи «интернета вещей». При реализации этой идеи большинство бытовых приборов, автомобилей и иных электронных приборов будут объединены в глобальную сеть, которая будет доступна всем и даст возможность обмена информацией всех со всеми. Применительно к сфере автотранспорта это означает, что данные с датчиков практически всех автомобилей будут доступны для их анализа и получения различной информации о состоянии транспортных потоков не только заданных районов, но и целых городов. Этот кластер информации полностью закроет потребности в исторических данных, а также данных о текущей дорожной ситуации, которые необходимы для моделирования транспорта на различных этапах жизненного цикла УДС, от оперативного регулирования до проектов ее развития.

Однако для осуществления подобного анализа и моделирования работы транспортных сетей на основе получаемой исторической информации необходимы инструменты, которые бы позволяли осуществлять достоверную симуляцию.

Ранее основные вехи развития моделирования транспорта уже были затронуты в той или иной степени, сейчас же семейства моделей и этапы их развития будут рассмотрены более подробно.

1.3 Развитие методов моделирования городских транспортных потоков

В наше время, согласно информации, изложенной в некоторых исследованиях [33, 97], многие средние и крупные города страдают от переизбытка транспортных средств, который ведет к образованию заторов на дорогах. С проблемами недостаточности пропускной способности дорожно-транспортной сети, так или иначе, начинают сталкиваться города в ситуации, когда уровень автомобилизации достигает 50–100 машин на 1000 жителей.

Помимо решения локальных задач, например, таких как повышение пропускной способности, также необходимо удовлетворять потребности общества, в частности — повышать объемы и качество транспортного сообщения, делать его как можно более безопасным и надежным.

Общепринятые критерии качества дорожного движения — уровень загрязнения окружающей среды, уровень шума, расход топлива, предупреждение образования и распространения транспортных заторов, применимы как к западным, так и к российским магистралям [18].

Решение задачи удовлетворения перечисленных выше критериев зачастую требует обширных инвестиций в развитие дорожно-транспортной инфраструктуры. Но это не всегда возможно, а также сопряжено с большими рисками при недостаточной степени изученности вопросов закономерности функционирования и развития сложившегося состояния транспортной сети. Игнорирование же необходимости исследовать эти закономерности зачастую приводит к неудачным проектным решениям, которые потом крайне сложно устранить, что, в свою очередь, ведет к частому образованию заторных ситуаций, перегрузке или же недогрузке отдельных участков сети, повышению аварийности, а также ухудшению экологической ситуации. Соответственно, необходим поиск приемлемых способов исследования процессов происходящих во время движения транспорта по улицам городов и загородных магистралей.

Внесение любых инфраструктурных изменений, как и управление уже сложившейся дорожной сетью, может быть в корне ошибочным, если не принимать во внимание широкий спектр характеристик транспортного потока, закономерности влияния внешних и внутренних факторов на динамические характеристики смешанного потока [18].

Транспортный поток многообразен и не стабилен, критерии управления им противоречивы, а дорожные условия могут быть непредсказуемыми из-за погоды и параметров полотна дороги. Все эти факторы в значительной степени осложняют теоретические и практические исследования в области математического моделирования транспортных потоков.

Несмотря на сложность моделирования, в первую очередь оно необходимо из-за следующих свойств транспортной системы [18]:

- Компенсация увеличения пропускной способности при развитии сети увеличением спроса и перераспределением его в новых условиях.
- Непредсказуемость поведения каждого водителя — выбор маршрута, маневра вождения и т.д.
- Влияние случайных факторов (ДТП, погода и т.д.) и флуктуаций, связанных с сезонами, выходными и праздничными днями и т.п.

Транспортный поток все время подстраивается под управляющие воздействия, именно поэтому для принятия решения о модернизации дорожной инфраструктуры необходимы не только грубые экспертные оценки, но и детальное моделирование.

Альтернативой расширению дорожной инфраструктуры является управление ее сложившейся конфигурацией с целью повышения мобильности, сохраняя при этом безопасность и, по возможности, постоянство потока. В конечном счете выполнение поставленных целей может привести к уменьшению использования транспортных средств или же хотя бы к невыполнению условий, способствующих появлению заторных ситуаций на дорогах.

Городские магистрали и их пересечения способны обслуживать некое максимальное количество транспортных средств в определенный период времени. При превышении этого максимума на участке улиц время в пути увеличивается и образуется затор [41, 114].

Заторные ситуации и сниженная пропускная способность дорожно-транспортной сети являются крайне острыми и неприятными для участников движения недостатками, потому что они сопровождаются потерей времени, снижением продуктивности труда, упущенными возможностями, задержками поставок, увлечением их стоимости и т.д. Если посмотреть на плохую пропускную способность транспортной сети и частое проявление заторных ситуаций — это также означает низкое качество жизни, неустойчивую мобильность населения и проблемы с загрязнением окружающей среды. Таким образом, расширение дорожной

инфраструктуры не дает решения задач повышения качества работы УДС города, повышения пропускной способности и предотвращения образования заторных ситуаций, а, как ни странно, лишь усугубляет ситуацию. Примером доказательства того, что инфраструктурные изменения сети не всегда дают положительный результат, является использование широко распространенного, но неэффективного подхода — увеличения количества полос. Известно, что при появлении новых полос движения за счет урезания пешеходного пространства, крайние полосы зачастую используются автомобилистами для парковки.

Конечно, решение задач такого рода не может нести частный характер. Это должно быть комплексное решение, затрагивающее улучшение работы светофорного регулирования, развитие общественного транспорта, систем навигации и выбора маршрута и т.д.

Главнейший аспект, который следует учитывать в первую очередь — это светофорное регулирование. Его целью является уменьшение задержек и снижение уровня перегруженности дорожных сетей, в качестве побочного результата также сокращается загрязнение окружающей среды на перекрестках. Светофоры регулируют движение на пересечениях проезжих частей для того, чтобы избежать потенциального столкновения транспортных средств, а также обеспечивают безопасность дорожного движения. Однако светофорное регулирование приводит к задержкам, простоям транспортных средств, ускорению и торможению вблизи перекрестков в зависимости от сигнала светофора. Задержки на перекрестках создают очереди, которые особенно быстро разрастаются при большом количестве подъезжающих транспортных средств. Соответственно, длина очереди перед светофором является индикатором эффективности его работы и в тоже время грубым мерилем уровня загрязнения окружающей среды. Чем больше размер очереди, тем больше связок «торможение-простой-ускорение», что, в свою очередь, ведет к большей интенсивности выбросов выхлопных газов, чем при монотонном движении транспортного потока [87]. Имеется ряд исследований, которые касаются связи между выбросами выхлопных газов и параметрами светофоров, в основном эти исследования оперируют терминами управления задержками [51, 56, 77, 105].

В настоящий момент уже осуществлены различные исследования в разнообразных направлениях, целью которых, так или иначе, является оптимизация циклов работы светофоров, как на перекрестках, так и на других видах пересечения дорог.

Именно для этой задачи используются несколько семейств математических моделей транспортного потока, в том числе и на основе клеточного автомата.

Приведём результаты рассмотрения этапов развития моделирования транспорта, основные семейства и группы математических моделей транспортного потока, описанные в работе [12]. Основой для представленного обзора и анализа являются материалы, изложенные в работах [7, 18, 107].

1.3.1 Семейства микроскопических моделей

Это семейство моделей считается самым ранним и даже основополагающим. Модели, принадлежащие к этой группе, основываются на предположении, что все водители подстраивают свою скорость в соответствии с поведением и расстоянием до лидера. Самым многочисленным видом моделей, входящих в это семейство, являются модели следования за лидером.

Рассмотрим основные группы моделей данного семейства.

1.3.2 Модели безопасного расстояния

Наиболее ранним исследованием в данном направлении является работа [89], в которой новая позиция транспортного средства (ТС) определяется его текущей позицией, дистанцией до лидера, длиной лидирующего ТС и параметром допустимой дистанции между рассматриваемым ТС и лидером.

В статье [68] исследователи изменили константное значение дистанции до лидера на функцию, зависящую от скорости, также была добавлена задержка во времени, которая позволила моделировать не мгновенную реакцию водителя на изменения поведения лидера.

В дальнейшем модель следования за лидером на безопасном расстоянии была уточнена в работе [50]. Автор добавил предположение о том, что водители

движутся так быстро, как это позволяют ограничения по скорости и расстояние до лидера. Данный подход ввел понятие двух режимов ограничения скорости: когда скорость ограничивается самим ТС и когда скорость ограничена скоростью и положением лидера.

В 2002 году Ньюэлл (Newell) упростил свою ранее опубликованную модель [82], в новой версии предполагается, что ТС следует за траекторией лидера с заданным по времени шагом и в зависимости от расстояния до лидера.

В дальнейшем несколько гибридных моделей были сформулированы на основе микромоделей Ньюэлла с применением макромоделей LWR [37, 75].

И наконец, в работе [71] была предложена модель, схожая с моделью Ньюэлла 2002 года. Авторы ввели разделение водителей на робких и агрессивных.

1.3.3 Модели стимулов и ответов

В данном направлении семейства моделей следования за лидером предполагается, что водители реагируют ускорением или замедлением на три вида стимулов:

1. их собственную скорость;
2. расстояние до лидера;
3. скорость относительно скорости лидера (скорость отставания).

Фундаментальными работами в этом направлении стали разработки [42, 52, 53]. В результате совместных усилий появилась знаменитая на данный момент модель GHR, названная в честь ее автора [49].

В 1991 году Бэкстоун (Backstone) и Макдональд (McDonald) пришли к выводу, что данные модели используются не так часто, в основном, из-за противоречивых выводов о значениях их параметров. Не смотря на это, после 1990 годов работа в этом направлении заметно активизировалась, стали создаваться новые модели, и данное направление вновь обрело популярность. Наиболее актуальные и интересные работы этой группы [31, 32, 100, 103, 111, 112].

Также часть исследований в данной группе микромоделей базируется на трехфазной теории Кернера (Kerner) [62, 64], в частности, модель задержки уско-

рения 2006 года Кернера и Кленова (Klenov) и модель следования за лидером тех же авторов 2002 года учитывают три режима транспортного потока.

1.3.4 Модели точек действия

Последней подгруппой моделей следования за лидером являются модели точек действия (action point models). Первыми работами в данном направлении стали исследования [38, 110]. Основной идеей данной подгруппы моделей является предположение о том, что водители начинают реагировать, только если они понимают, что сближаются с другим ТС. Эта концепция была описана Михаэльсом (Michaels) еще в 1965 году.

1.3.5 Мультиклассовые и мультиантисипационные модели

В основной массе работ, относящихся к моделям следования за лидером, транспортный поток принимается однородным, все ТС ведут себя одинаково. Но так как моделируется поведение каждого ТС в отдельности, то почему бы не воспользоваться гетерогенностью транспортного потока, в таком случае ТС могут быть дифференцированы по максимально возможным скоростям, времени реакции водителей и т.д. На самом деле, большая часть инструментов моделирования, которые основываются именно на мультиклассовых моделях следования за лидером (multi-class car-following models), учитывают гетерогенную природу транспортного потока.

Мультиантисипационные модели (multi-anticipation models) — это другой способ расширить поведение классических моделей следования за лидером тем, что на поведение конкретного ТС влияет не только его непосредственный лидер, но и другие ближайшие ТС. Подобный подход стал особенно популярен после разработки мультиантисипационной версии GHR модели [36]. Более новые мультиантисипационные модели были представлены в модели оптимальной скорости [76] и модели умного водителя [101]. И наконец, мультиантисипационные и мультиклассовые модели были объединены вместе в работе [86] для того, чтобы показать, что некоторые водители смотрят вперед дальше, чем другие.

1.3.6 Модели на клеточных автоматах

Как известно, концепция клеточного автомата (КА) была предложена фон Нейманом и позже довольно успешно применена к моделированию транспортных потоков.

Модели на основе теории клеточного автомата (ТКА) относят к семейству микромоделей, хотя они и сильно отличаются от всех остальных видов этой группы.

Рассматриваемые модели отличаются от моделей следования за лидером тем, что пространство дискретно (поделено на клетки одинаковой длины).

В основном, длина клетки принимается равной средней длине легкового автомобиля, например 7,5 м. Помимо того что пространство дискретно, время также принимается дискретной величиной. Зачастую шаг по времени берется равным среднему времени принятия решения автомобилистом, которое примерно равно 1 сек. На каждом шаге работы автомата ячейка может быть свободна или же занята ТС. Модели могут быть как одноклеточными, когда все ТС имеют длину равную одной ячейке, так и многоклеточными, когда ТС могут занимать несколько ячеек.

Одним из основных достоинств этого семейства моделей является возможность параллельной обработки получения нового состояния ТС, все клетки автомата переходят в новое состояние параллельно и зависят только от предыдущего состояния модели, в основном, конечно, только от состояния ближайших клеток.

В работе [66] можно увидеть детальный анализ и сопоставление результатов моделирования для однонаправленной однополосной дороги, полученных с помощью различных, на данный момент уже фундаментальных, моделей данного вида.

1.3.7 Семейство мезоскопических моделей

Данное семейство моделей разработано для того, чтобы заполнить разрыв между микроскопическими моделями, которые описывают поведение отдельных ТС, и макроскопическими моделями, в которых транспортный поток уподобляет-

ся потоку «мотивированной» сжимаемой жидкости. Мезоскопические модели описывают поведение ТС в терминах распределения вероятностей. Поведенческие правила задаются для каждого отдельного ТС. Семейство включает в себя модели, представленные в работах [39, 40, 79], в том числе и кластерные модели. Одна из наиболее популярных подгрупп данного семейства — это кинетические модели. Впервые данный подход из физики для моделирования поведения большого количества атомов и молекул газа был применен к моделированию транспортных потоков Пригожиным при участии Эндрюса (Andrews) и Хермана (Herman) [90, 91]. Наиболее полная модель данного семейства описана в работе [55], в которой основные предыдущие разработки рассматриваются как специальные случаи.

Газокинетические модели, которые входят в данное семейство, как таковые, в основном, не используются в симуляциях, но непрерывные модели используются — например, в работе [99] используется непрерывная газокинетическая модель, которая явно включает в себя простую модель следования за лидером.

1.3.8 Семейство макроскопических моделей

В макроскопических моделях или же моделях-аналогах движение ТС уподобляется какому-либо физическому потоку. Данные модели описывают транспортный поток, как если бы он был непрерывен. Подобные модели часто сравнивают с моделями непрерывных потоков жидкостей. Каждое отдельное ТС не моделируется, однако термины средней плотности и среднего потока все же используются.

Рассмотрим основные группы моделей данного семейства.

1.3.9 Модели кинематических волн

Впервые модели данной группы были представлены в работе Лайтхилла (Lighthill) и Уизема (Whitham) [78] и независимо в работе Ричардса (Richards) [92]. Впоследствии эти базовые модели кинематических и ударных волн были названы моделями LWR или же Лайтхилла-Уизема.

Основным недостатком этой относительно простой модели транспортного потока является бесконечное ускорение ТС вследствие того, что скорость меняется мгновенно вслед за изменением состояния потока. Эта проблема решается гидродинамическими моделями второго порядка, а также некоторыми модификациями LWR-моделей, например, в работах [72, 74] представлено ограниченное ускорение. Другим недостатком LWR-моделей является переход потока от свободного к плотному, который происходит всегда при одной и той же плотности и без явления гистерезиса (возврата потока в устойчивое состояние при меньших значениях плотности [104]) или же падения пропускной способности. Данная проблема рассматривалась и решалась в работах по введению смены полосы движения в дискретной версии LWR-моделей, которой является СТМ-модель Даганзо (Daganzo) [45, 47, 59, 70]. В работе [54] предложена стохастическая модель кинематических волн, в которой разрыв может происходить при различных плотностях. Несколько иные фундаментальные диаграммы представлены в работах [57, 58], в которых описываются другие стохастические модели кинематических волн.

1.3.10 Мульти-классовые модели кинематических волн

В последнее десятилетие велись довольно активные исследования в области создания моделей транспортного потока данного вида.

Даганзо в своей работе [44] предложил мульти-классовую многополосную модель на основе LWR-модели. Он разделил всех водителей на две категории: слизняков (slugs), которые едут медленно и редко идут на обгон, и кроликов (rabbits), которые стремятся ехать быстро и обгоняют чаще. Другие мульти-классовые кинематические модели в основном однополосные. Они основываются на предположении, что могут быть несколько полос, но в явном виде разница между полосами не учитывается.

Вонг (Wong) в своей работе [113] первым представил однополосную мульти-классовую модель кинематических волн. В этой работе он предложил использовать отдельное уравнение сохранения потока для каждого класса ТС. Также скорость класса зависит от суммарной плотности ТС данного класса. Было пока-

зано, что модели подобного вида могут повторять феномен, относящийся к разбросу в фундаментальной диаграмме лучше, чем модели смешанных классов [34, 44, 102, 113].

Введение различных длин ТС между классами [35, 43] позволило для двухклассовых моделей перейти к трехмерной фундаментальной диаграмме.

В работе [84] использован схожий подход для фундаментальных взаимосвязей при использовании параметров модели зависящих от состояния потока. Среди параметров также присутствует тот, что характеризует количество пассажиров, которому эквивалентен класс ТС. Например, для легкого грузовика это полтора пассажира, в то время как для тяжелого грузовика это может быть три пассажира. Впоследствии эта модель была расширена в работах [85, 108], где были включены не монотонные фундаментальные взаимосвязи и стохастические параметры.

Наиболее новые наработки в этой области описаны в работах [81, 106, 108].

1.3.11 Семейство гидродинамических моделей второго порядка

Это четвертое и последнее семейство математических моделей транспортных потоков. Данные модели включают в себя уравнение, описывающее ускорение (динамику скоростей), а также дифференциальное уравнение для моделирования динамики средней скорости. Пэйн (Payne) в работе [88] унаследовал простую модель стимулов и ответов (stimulus-response model) из группы моделей следования за лидером. Полученная в результате макроскопическая модель состоит из фундаментальной взаимосвязи и пары частных дифференциальных уравнений, отсюда и название моделей второго порядка. Недостатком описанной Пэйном модели является устойчивость в линейном приближении к малым возмущениям при всех значениях плотности стационарного однородного решения уравнения Пэйна [18].

Даганзо в своей работе [46] утверждал, что модели данного вида обладают серьезными недостатками, в частности, тем, что они не анизотропные, подразумевая, что в данных моделях ТС могут двигаться назад. После данной публикации

довольно быстро были представлены работы, исправляющие данный недостаток, например [30].

В заключении стоит отметить, что в работе [73] было предложено обобщенное представление моделей данного вида, включая несколько моделей в качестве частных случаев.

1.3.12 Применение моделей транспортных потоков

Как видно из предыдущего раздела, за последние полвека было разработано большое количество различных направлений моделирования транспортного потока. Каждое из них обладает своими преимуществами и недостатками. Однако какой бы целью не задавалось применение моделирования транспортных потоков, в любом случае, необходимо решить, что важнее — наглядность и точность прогноза, или же скорость проводимой симуляции.

Первой из двух основных групп является применение моделей для долгосрочного планирования развития УДС. Для решения таких задач скорость моделирования уходит на второй план, а во главу угла ставится точность прогнозов, возможность выполнения различных сценариев моделирования и в том числе вероятностная природа моделей. Для подобного рода задач, возможно, лучше всего подходят стохастические модели следования за лидером или же другие модели с вероятностными фундаментальными диаграммами, в их число входят многие новые модели на основе ТКА.

Второй группой являются проактивные системы регулирования движения, которые используют моделирование для оценки, предсказания и регулирования состояния транспортных потоков, именно поэтому для таких систем важна скорость процесса моделирования. В этих приложениях, возможно, оптимальным будет использование моделей с простой математической формулировкой и не сложными фундаментальными диаграммами.

Для упрощения представления моделей транспортного потока на основе ТКА в работе [23] был предложен подход их рефакторинга.

Даже в свете того, что новые компьютеры будут обходить своих предшественников по производительности, необходимость в быстрой симуляции вряд ли упадет, например, это будет актуально для сравнения множества вариантов на больших топологиях транспортных сетей.

Уилсон (Wilson) в своей статье 2008 года [112] говорит о том, что в течение следующих нескольких лет мы можем ожидать окончательного разрешения конфликта различных школ моделирования транспорта. Как бы то ни было, в различных приложениях вес критериев применимости варьируется. Именно поэтому в статье [107] в дереве моделей видно, насколько много различных веток было разработано за последние десятилетия, более того, как уже было сказано ранее, это ведет к разработке новых гибридных моделей. Даже в одном и том же приложении может потребоваться использование как результатов детального моделирования (например, главные дороги городской транспортной сети, которые необходимо контролировать), так и менее детализированное моделирование для оставшихся участков сети (например, для прилегающих дорог, которые не нуждаются в регулировании).

1.3.13 Перспективы развития моделей транспорта на основе теории клеточных автоматов

Основными перспективами развития моделей транспортных потоков на основе ТКА видится их развитие в сторону универсализации правил построения моделей данного семейства, их интеграции с моделями других семейств для создания гибридных моделей, а также работа над кластеризацией вычислений больших комплексных топологий. Хотя модели данного семейства и нуждаются в больших вычислительных мощностях, но все же, исходя из постепенного снижения стоимости вычислительных ресурсов, это уже не является столь ощутимым недостатком, как десять лет назад.

В работах [23, 28, 94] представлены исследования в области универсализации представления моделей рассматриваемого семейства. Также в статье [96] были сформулированы модель перестроения для многополосной однонаправленной

дороги и мотивации смены полосы движения. Можно также сказать, что модель и мотивации смены полосы движения являются существенной частью процесса моделирования движения транспорта в противовес высказываниям исследователей, которые пренебрегают перестроениями ТС в процессе моделирования, например, в работе [66].

1.3.14 Перспективы применения моделей транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов в решении задач средних и крупных городов

Спецификой задач, стоящих перед многими средними и крупными городами, является тот факт, что в них не существует внедренной автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУДД). Для таких городов внедрение подобной системы зачастую слишком дорого и не оправданно, ведь еще не получен максимум от таких средств как регулирование работы перекрестков. Поэтому в такой ситуации оказывается уместным решение, не требующее больших материальных затрат и простое в процессе поддержки, но все же дающее ощутимые результаты повышения качества транспортного сообщения.

Бесспорным преимуществом моделей транспортных потоков на основе КА является то, что их представление и правила функционирования являются естественными для большинства людей и не требуют углубленного владения математическим аппаратом, который, безусловно, необходим, например, для использования макроскопических моделей. Также важным фактором является возможность проведения приемлемой по сложности поддержки и калибровки модели в процессе практического применения.

За счет того, что шаги моделей на основе ТКА в основном имеют простой и понятный физический смысл, поддержку и калибровку моделей могут осуществлять обычные программисты, не обладающие специальными знаниями.

В рамках работ [23, 28] проведены исследования, чей результат полезен со следующих точек зрения:

- упрощения представления правил функционирования моделей;
- снижения порога вхождения для осуществления поддержки моделей;

- снижения стоимости сопровождения системы за счет отсутствия необходимости в узких специалистах в области моделирования транспорта.

Рассмотрев этапы, которые прошло моделирование транспорта как научное направление, и то, как оно развивается на сегодняшний день, можно с уверенностью сказать, что задача моделирования топологий транспортных сетей не потеряла своей актуальности. Различные теории позволяют управлять движением транспорта на УДС городов. Группа моделей транспортных потоков на основе ТКА, в свою очередь, применяется во многих практических приложениях, в том числе и в гибридных моделях.

Проанализировав различные направления моделирования транспорта, которые в конечном счете позволяют повысить пропускную способность транспортных развязок, можно прийти к выводу, что разработан достаточно обширный инструментарий для решения задач различного рода. Работы в направлении развития существующих школ моделирования продолжаются, ведь еще не все задачи решаются достаточно точно и эффективно.

Для средних и крупных городов, которые не имеют дорогостоящих аппаратных и программных комплексов для управления дорожным движением, оптимизировать работу уже существующих транспортных развязок можно, используя модели транспортных потоков на основе ТКА [93].

Идеи, разработанные и описанные в работах [23, 28, 96], займут своё определенное место среди разработок моделей рассматриваемого вида и также будут полезны в практических приложениях для городов, где дорожно-транспортная сеть, а также уровень автомобилизации, еще не подошли к близкому насыщению.

1.4 Особенности применения систем управления движением транспорта в средних и крупных городах

Проследив основные тенденции развития подходов к управлению и организации дорожного движения, можно утверждать, что это поле научно-технической деятельности активно развивается как в отношении методов построения архитектуры транспортной сети, так и в отношении программного и технического обес-

печения интеллектуальных систем интегрированных в дорожную инфраструктуру городов.

Изучив историю развития светофорного регулирования, а также возникновение полностью противоположной концепции бесветофорной организации движения, можно отметить, что простор для обоснованного выбора способа организации и управления дорожной сетью существует. А добавив сюда возможности развития городского пассажирского транспорта, использования АСУДД, введения понятия платной дороги, строительства многоэтажных дорожных развязок и многого другого, получим, что руководство любого крупного населенного пункта способно найти все необходимые методы и средства мониторинга ситуации на дорогах, борьбы с пробками, загрязнением воздуха, чрезмерной концентрацией транспортных средства в историческом центре города и т.д.

Однако не все из перечисленных вариантов одинаково хорошо подходят для встречающихся сценариев использования. Города различного масштаба зачастую также решают стоящие перед ними задачи разных порядков сложности и размера вовлекаемых ресурсов.

Если мы сконцентрируемся на средних и крупных городах, то мы можем условно разбить их на две категории, а именно: города с развитой системой автоматического сбора дорожной информации и города с куда более скромным бюджетом и небольшим набором уже внедренных комплексных решений.

Для городов с достаточным количеством капиталовложений, направленных в сферу транспорта, а также уже внедренными средствами сбора информации о параметрах транспортных потоков и развязок города, на данный момент существует обширный выбор того, какими инструментами и методами воспользоваться, чтобы уменьшить нагрузку на транспортную инфраструктуру, снизить издержки перевозки пассажиров и грузов, повысить пропускную способность тех или иных «узких» мест в сети города.

Что же касается крупных городов с ограниченным бюджетом и уже существующими проблемами в организации и управлении движением транспорта, то им можно посоветовать применение максимально простых в эксплуатации и обу-

чении персонала, а также не требующих долгосрочного внедрения программных продуктов, которые, однако, должны позволять осуществлять достаточно эффективное планирование развития УДС города.

Для создания подобных гибких, не слишком затратных, но позволяющих работать на перспективу систем следует упорядочить процессы разработки градостроительных прогнозов и сформировать новую, адекватную времени систему градостроительного проектирования, основанную на возможностях современной теории принятия решения, имитационного моделирования, САПР, геоинформационных технологий и систем.

Система автоматизации градостроительного проектирования и управления строительством должна разрабатываться как многоцелевая, многоуровневая система, автоматизирующая обоснование любых проектных вариантов и процесс их реализации. При необходимости, особенно в условиях дефицита информации, она должна функционировать как экспертная система, формализующая и автоматизирующая процессы подготовки принятия решений в многофакторных и многокритериальных задачах, реализуя совокупность моделей, позволяющих соотнести затраты на развитие городов и районов с полученным экономическим эффектом и влиянием на экологическую обстановку.

Проблема целенаправленного развития и рационального функционирования транспортных систем городов должна рассматриваться своевременно, на современном уровне, т.е., прежде всего, комплексно для всей транспортной системы, а не как конгломерат разнообразных мероприятий по улучшению работы отдельных элементов улично-дорожной сети города.

Таким образом, очевидна необходимость разработки недорогих систем (методов) регулирования (организации движения) в городах, основанных на прескриптивном принципе системного подхода, позволяющих управлять не только транспортным потоком, но и развитием элементов улично-дорожной сети (совершенствованием в конечном итоге ее структуры, исходя из оптимального функционирования системы).

Анализ существующих способов, методов и систем регулирования и организации движения в городах показывает, что в настоящее время принято считать, что в случае, если средства и способы изолированного регулирования (организации) движения на перекрестках улично-дорожной сети не эффективны или не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, то необходимо устройство АСУДД какого-либо типа. Большая часть исследований и разработок в этой области, в основном, направлена на создание или совершенствование таких систем. АСУДД действительно позволяет в определенной степени улучшить условия в городе, однако их создание и эксплуатация требуют значительных денежных затрат, а улично-дорожная сеть при этом не совершенствуется, обрстая необходимым для функционирования АСУДД реквизитом.

Целесообразно найти путь улучшения организации движения транспорта в городе по прескриптивному принципу системного подхода, не прибегая к созданию сложных АСУДД, используя имеющиеся на городских пересечениях средства регулирования, а главное — создав инструмент моделирования поведения системы, с помощью которого можно было бы определять пути рационального развития улично-дорожной сети, исходя из оптимального функционирования транспортной системы.

Цель функционирования такой системы формально может быть интерпретирована как «пропуск транспортных потоков через улично-дорожную сеть города с заданными режимами движения».

Сравнение таких решений необходимо, так как теоретически может существовать множество вариантов достижения цели, и, естественно, возникает проблема альтернативного выбора лучшего из них. Сравнение вариантов предполагает наличие обоснованного критерия эффективности.

Если рассматривать под основными мероприятиями по организации движения только светофорное регулирование, то в качестве критерия эффективности работы системы могут быть использованы суммарные потери времени транспорта на пересечениях города. Чем меньше эти потери, тем больше скорости сообще-

ния, и, следовательно, выше производительность и ниже себестоимость автомобильных перевозок.

Если городские районы достаточно изолированы один от другого, то целесообразно рассматривать и соответствующие им системы взаимосвязанных пересечений, то есть решать задачу не для города в целом, а для районов. Подобная постановка задачи нашла свое развитие в работе [10].

В качестве же текущего и будущего направления развития организации и управления движением видится тотальная интеграция дорожной инфраструктуры с программно-техническими комплексами управления транспортной обстановкой и участниками дорожного движения. Таким образом, получаем единое информационное пространство, в котором водитель играет роль не только реципиента управляющих воздействий, но и непосредственного участника процесса поддержания баланса оптимальной загрузки дорожно-транспортной сети города [29].

1.5 Выводы по Главе 1

1. В настоящее время города сталкиваются с проблемами недостаточной пропускной способности улично-дорожной сети. Это вызвано несколькими причинами, такими как: неэффективное регулирование дорожного движения, использование неадекватных ситуации инструментов повышения эффективности работы УДС, принятие ошибочных или неэффективных решений по модернизации дорожно-транспортной инфраструктуры города, неправильный выбор стратегической задачи регулирования дорожного движения и управления сложившейся УДС.
2. Поскольку зачастую для регулирования дорожного движения параметры таких ключевых элементов сети, как, например, светофоры, выставляются на основе непроверенных экспертных оценок, возникает проблема неэффективного регулирования дорожного движения, как было показано в пункте 1. На данный момент существует целый спектр различных разработок как теоретических, так и прикладных, в области моделирования транспортных потоков, которые способны довольно успешно решать

многие из стоящих перед городом задач. Важно отметить, что не всякая группа математических моделей транспортного потока и инструмент, построенный на ее основе, применимы для широкого спектра задач, в частности, потому что какие-то работают на микроуровне, в то время как другие рассматривают транспортный поток как неделимое целое. Таким образом, имея базовый инструментарий, необходимо использовать его для проверки экспертных оценок моделированием и, в частности, для поиска наиболее оптимальных режимов работы светофоров.

3. Во многих ситуациях при возникновении проблем с недостаточной пропускной способностью УДС города априори делается болезненная и не всегда подготовленная попытка перехода к АСУДД, как единственному стоящему решению, позволяющему избавиться от краткосрочных проблем и дающему задел на будущее. Однако такой выбор самого тяжеловесного и дорогостоящего решения может оказаться ошибочным, например, в той ситуации, когда не был получен максимум от куда более легких, гибких и простых в использовании средств моделирования. Следовательно, внедрение АСУДД может быть преждевременным и неуместным, хотя, безусловно, переход к ним в большинстве своем является логичным на определенном этапе развития УДС города.
4. Как уже было отмечено в пунктах 1 и 2, существует опасность реализации ошибочных или неэффективных решений по модернизации дорожно-транспортной инфраструктуры города на основании непроверенных моделированием экспертных оценок. Возможно, случаем с самыми трудноустраняемыми последствиями является изменение архитектуры УДС для повышения пропускной способности пересечений и перегонов без предварительного моделирования. Ведь в ситуации, когда проект не адекватен условиям его внедрения и не может учесть всех аспектов сложности решения задачи регулирования дорожного движения на аналитическом уровне, то результаты его внедрения будет крайне трудно исправить не

только по причинам больших трудозатрат, но и необходимости наличия определенной политической воли.

5. Пожалуй, основной проблемой управления дорожным движением в России во многих городах является неправильное понимание ее главной стратегической задачи. Сейчас принятие решений связано лишь с борьбой с локальными трудностями и получением краткосрочных выигрышей в пропускной способности отдельных элементов УДС города. И этот наиболее легкий в реализации подход ведет в тупик, из которого крайне сложно выбраться. Ведь при отсутствии стратегического взгляда на проблемы города в целом, без понимания конечной цели и того, как к ней прийти, нельзя надеяться на удачу в принятии слабо согласованных между собой решений локализованных задач. Именно поэтому задача развития УДС города должна занимать соответствующую и даже главенствующую роль в процессе регулирования дорожного движения и управления УДС города, и решение любых, даже самых незначительных проблем, должно в первую очередь согласовываться с ней.

ГЛАВА 2. ФОРМИРОВАНИЕ АДЕКВАТНЫХ СОВРЕМЕННЫМ ПОТРЕБНОСТЯМ КРУПНЫХ ГОРОДОВ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ И ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТА

2.1 Обоснование актуального подхода к управлению и организации движения транспортных потоков в городских условиях

Представленные в главе 1 результаты анализа подходов к управлению движением транспорта в городах и систем управления городскими транспортными потоками, а также используемые для достижения этой цели существующие математические модели транспортных потоков показывают, что хотя рассматриваемое направление научных исследований имеет обширную историю, а также серьезные теоретические и практические результаты, тем не менее, в связи с ростом напряженности в экономической ситуации, вызванной глобальной нестабильностью в мире, сокращением бюджета выделяемого для сферы транспорта и множеством других факторов, на первый план выходит выбор эффективных решений по управлению движением и развитию УДС городов с малыми денежными затратами, но с ощутимым повышением качества предоставляемых населению транспортных услуг.

Не смотря на то, что сейчас на первый план выходит использование гибких и недорогих инструментов, современная практика управления дорожным движением, в большинстве своем, акцентирует внимание на регулировании дорожного движения, в то время как вопрос развития УДС отодвигается на второй план, либо и вовсе игнорируется. Все усилия сосредотачиваются преимущественно на оперативном управлении и получении локальных краткосрочных улучшений в дорожной ситуации городов, что в целом не плохо, однако все же не является стратегической задачей управления дорожным движением.

Одной из крайностей, вытекающей из складывающегося подхода оперативного регулирования сложившейся УДС городов, является использование АСУДД, как средства необходимого всегда и везде при возникновении проблем недоста-

точной пропускной способности транспортной сети. Разумеется, подобные системы нужны, и переход к ним в конечном итоге должен быть осуществлен для всех городов, но необходимость их использования должна естественно вытекать из достижения предельных результатов, доступных более простым и гибким системам и инструментам. Также стоит отметить, что использование АСУДД зачастую не предполагает развития УДС, а лишь работу над регулированием работы ее уже сложившейся конфигурации.

Таким образом, в ситуации, когда для города не внедрена АСУДД, нет серьезного оснащения УДС системами сбора и анализа информации о составе, плотности и скоростных характеристиках транспортного потока, можно смело говорить о необходимости использования средств моделирования работы топологий УДС города, оптимальных по соотношению стоимость внедрения к качеству получаемых результатов. Также подобного рода инструменты являются естественным базисом для того, чтобы осуществлять в определенной степени достаточно эффективное развитие УДС на среднесрочную и долгосрочную перспективу. Используя средства моделирования топологий для различных вариантов их конфигурации, появляется возможность сравнивать между собой эффективность применения тех или иных проектных решений к сложившейся УДС города с целью повышения эффективности ее работы. Важно отметить, что таким образом можно сравнивать как решения, требующие больших материальных затрат на свою реализацию и затрагивающие дорожно-транспортную инфраструктуру, так и решения, которые лишь меняют конфигурацию средств регулирования дорожного движения, без каких бы то ни было инфраструктурных изменений.

Конечно же, использование недорогих и гибких инструментов не всегда сможет соответствовать неуклонно возрастающим нагрузкам на УДС больших городов, и в какой-то момент необходимо переходить к внедрению АСУДД. Однако даже при обоснованном и подготовленном внедрении АСУДД для регулирования работы УДС города нельзя забывать о развитии указанной сети, так как какие бы системы не использовались для управления дорожным движением и регулирования работы транспортной системы, в целом всегда существует предельная

плотность транспортного потока, при которой никакие системы не смогут предотвратить и успешно бороться с заторной ситуацией.

Таким образом, система управления УДС должна выглядеть так, как она представлена на рис. 2.1. Целью такой системы является повышение эффективности работы УДС. Результатом же её работы является оперативный выбор лучшего сочетания схем организации движения на перекрёстках и проект развития УДС [27].

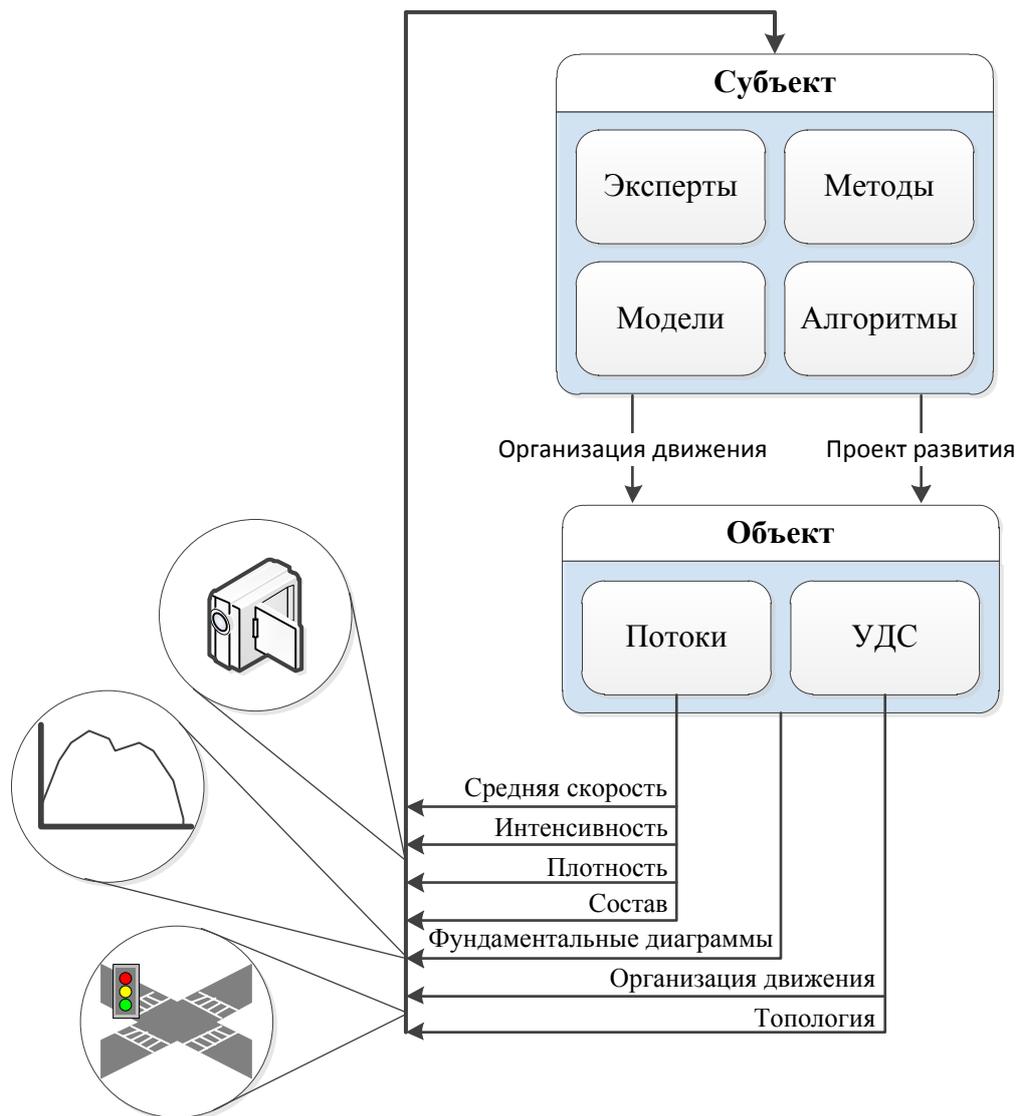


Рис. 2.1. Система управления УДС

2.2 Актуальность использования семейства моделей транспортных потоков на основе клеточного автомата для средних и крупных городов

На сегодняшний день сильное развитие получили не только суперкомпьютеры, но и обычные рабочие станции большинства пользователей персональных компьютеров, не говоря уже о таких устройствах, как планшеты и даже смартфоны. Именно этот фактор во многом задает направляющий вектор к тому, что сегодня для решения многих ресурсоемких задач все меньше внимания уделяется оптимальности по времени и по памяти, в отличие от периода десяти-двадцати летней давности. С одной стороны, это плохо, ведь теряется внимание к деталям, падает качество предоставляемых решений, а с другой — это естественный ход развития.

Применительно к решению задач моделирования транспортного потока, согласно анализу, изложенному в главе 1, есть модели, рассматривающие транспортный поток как целое и моделирующие его поведение условно, с помощью дифференциальных уравнений, а есть вторая разновидность моделей, которые используют значительные вычислительные мощности, т.к. ведут свою работу на уровне групп автомобилей или же моделируют поведение каждого ТС в отдельности.

Таким образом, следует, что во многих случаях в значительной степени можно пренебречь большой ресурсоемкостью решений, основанных на микромоделировании, в угоду простоте и понятности правил функционирования моделей этого семейства.

Соответственно, в качестве базы недорогих и гибких инструментов должна выступать модель транспортного потока, а добавив сюда изложенные соображения по поводу требований к ее общим характеристикам, необходимо использовать модель из семейства микромоделей с понятными и легко-модифицируемыми правилами функционирования.

В качестве группы моделей, подходящих под это описание, выступает группа математических моделей транспортного потока на основе теории клеточных

автоматов. Правила их функционирования отличаются от своих собратьев естественностью, наличием относительно небольшого количества искусственных предположений, что, в свою очередь, ведет к простоте сопровождения подобных моделей даже не специалистами в области моделирования транспорта. Также математические модели на основе ТКА, предназначенные для любых сфер, в том числе и для моделирования транспорта, изначально обладают естественными возможностями для того, чтобы вести обсчет с использованием вычислительных кластеров, то есть позволяют работать с собой в многопоточном режиме.

Помимо рассматриваемых возможностей для параллельной обработки перехода клеток модели в новое состояние, существуют интересные исследования, направленные на еще более внушительное ускорение получения результатов моделирования, что имеет ключевое значение для систем, работающих в режиме, приближенном к режиму реального времени. В рамках этих работ [10] предлагается использовать модель транспортного потока на основе ТКА в качестве первого уровня, целью которого является получение параметров топологии для модели второго уровня, построенной на основе теории сетей массового обслуживания.

Ставя перед собой задачу использования максимально простых в поддержке и во внедрении моделей, применительно к моделям транспортного потока на основе ТКА, отсутствует согласованный общий язык, который позволил бы объединить и согласовать во многом похожие, использующие общие концепции и соглашения модели. Наличие общего языка позволит снизить порог вхождения в данную область научной деятельности для новичков и избавить от ощущения излишней сложности представления по сути своей простых и естественных правил, понятных каждому. Именно решению этой задачи посвящен следующий параграф.

2.3 Унификация представления моделей транспортных потоков на основе клеточного автомата

На сегодняшний день направление, основанное на применении ТКА для моделирования сложных процессов, активно используется для моделирования

транспортных потоков. Основное отличие данного вида микромоделей заключается в относительной простоте поддержки, внедрения и анализа большинства из них.

Помимо простоты использования, также важным аргументом в пользу внедрения такого рода моделей является то, что можно вести расчеты в облаке одновременно на нескольких узлах кластера. Это осуществимо за счет того, что все клетки переходят в новое состояние параллельно в конце итерации моделирования. Таким образом, возможен процесс параллельной обработки изменений состояния клеток автомата.

Основными фундаментальными моделями, на которых базировались дальнейшие исследования моделирования транспортных потоков с помощью ТКА, являются: Правило 184 [69], Модель Нагеля-Шрекенберга [80], модель медленного старта [98], модель Кернера-Клёнова-Вольфа [60] и др.

Однако все многообразие моделей на основе ТКА, которые существуют на сегодняшний день, лишь частично согласуется друг с другом по способу формализации их поведения. Хотя зачастую законы их функционирования имеют много общего.

Рассмотрим перечисленные выше фундаментальные модели подробнее и попробуем проанализировать их на предмет общих этапов и закономерностей, которые помогут формализовать процесс построения правил, которые обновляют состояние клеток моделей на основе ТКА.

В качестве инструмента формализации и перестроения рассматриваемых моделей будем использовать рефакторинг. Этот подход давно известен и широко применяется при разработке ООП систем, формальное описание представлено М. Фаулером в книге [22]. Здесь не рассматриваются аспекты применения данного подхода именно к программированию, однако основные принципы и идеи, сформулированные М. Фаулером, применимы и к представлению математических моделей транспортных потоков на основе ТКА.

2.3.1 Правило 184

Рассмотрим данную модель применимо к движению автомобилей по однополосной дороге с максимальной скоростью равной одной ячейке за единицу времени.

Математическую модель смены состояния клетки можно записать следующим образом, здесь и далее первоначальная формулировка моделей базируется на материалах работы [9]:

1. Ускорение и торможение

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

2. Перемещение

$$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t) \quad (2)$$

В формуле (1) комбинируется модификация скорости и валидация. Новым значением скорости $v_i(t)$ становится $g_i(t - 1)$. Здесь и далее $v_i(t)$ — значение скорости в текущем такте, $(t - 1)$ — предыдущий такт работы автомата, а g_i — функция возвращающая расстояние от i -го транспортного средства (ТС) до едущего впереди. В качестве валидации выполняется проверка того, что полученная скорость не больше 1.

Формула (2) описывает перемещение текущего ТС вперед на количество ячеек, равное новому значению скорости. Здесь и далее n_i — функция, возвращающая порядковый номер ячейки для i -го ТС.

Теперь попробуем декомпозировать первый шаг на два: изменение скорости и валидацию. Модель примет следующий вид:

1. Ускорение и торможение

$$v_i(t) = g_i(t - 1) \quad (3)$$

2. Валидация превышения скорости

$$\text{if } v_i(t) > 1 \text{ then } v_i(t) = 1 \quad (4)$$

3. Перемещение

$$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t) \quad (5)$$

2.3.2 Модель Нагеля-Шрекенберга

Данная модель представляет собой стохастический многоклеточный автомат и имеет следующий вид:

1. Ускорение

$$v_i(t) = \min(v_i(t - 1) + 1, v_{max}) \quad (6)$$

2. Торможение

$$v_i(t) = \min(v_i(t), g_i(t - 1)) \quad (7)$$

3. Случайные возмущения

$$\text{if } \xi(t) < p \text{ then } v_i(t) = \max(v_i(t) - 1, 0) \quad (8)$$

4. Движение

$$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t) \quad (9)$$

В формуле (6), как и в случае с моделью Правило 184, модифицируется скорость и валидируется полученное значение. Здесь и далее v_{max} — максимально допустимая скорость транспортного средства. Разделим первый шаг данной модели на два:

1. Ускорение

$$v_i(t) = v_i(t - 1) + 1 \quad (10)$$

2. Валидация превышения максимально допустимой скорости

$$\text{if } v_i(t) > v_{max} \text{ then } v_i(t) = v_{max} \quad (11)$$

За счет поведения описанного в формуле (7) исключается возможность столкновение с впереди едущим ТС в случае, если полученная на первом шаге скорость больше расстояния до впереди едущего ТС. Перепишем данную проверку, используя логическое условие, а не функцию минимума.

3. Валидация столкновения с впереди едущим ТС

$$\text{if } v_i(t) > g_i(t - 1) \text{ then } v_i(t) = g_i(t - 1) \quad (12)$$

Выражение (8) вносит элемент стохастичности, который позволяет моделировать различные случайные процессы, проходящие во время движения. Здесь и далее ξ — случайная величина, распределенная равномерно. Данное выражение

так же, как и шаг ускорения, модифицирует скорость и ограничивает новое значение скорости нулём снизу. Снова разобьём шаг на два:

4. Случайные возмущения

$$\text{if } \xi(t) < p \text{ then } v_i(t) = v_i(t) - 1 \quad (13)$$

5. Валидация снижения скорости до отрицательного значения

$$\text{if } v_i(t) < 0 \text{ then } v_i(t) = 0 \quad (14)$$

На данном этапе мы получили 2 пары шагов, состоящих из модификации скорости и валидации. Теперь сгруппируем шаги, изменяющие скорость и валидирующие её новое значение. Перепишем полученную модель таким образом, чтобы за группой шагов модификации скорости шла группа шагов валидации:

1. Ускорение

$$v_i(t) = v_i(t - 1) + 1 \quad (15)$$

2. Случайные возмущения

$$\text{if } \xi(t) < p \text{ then } v_i(t) = v_i(t) - 1 \quad (16)$$

3. Валидация снижения скорости до отрицательного значения

$$\text{if } v_i(t) < 0 \text{ then } v_i(t) = 0 \quad (17)$$

4. Валидация превышения максимально допустимой скорости

$$\text{if } v_i(t) > v_{max} \text{ then } v_i(t) = v_{max} \quad (18)$$

5. Валидация столкновения с впереди едущим ТС

$$\text{if } v_i(t) > g_i(t - 1) \text{ then } v_i(t) = g_i(t - 1) \quad (19)$$

6. Движение

$$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t) \quad (20)$$

Таким образом, в общем случае удаётся выделить 3 этапа работы моделей:

1. применение шагов изменения скорости;
2. применение шагов валидации;
3. движение с новой скоростью.

2.3.3 Модель медленного старта

Модели, рассмотренные выше, равно как и их аналоги имеют недостаток — они не способны воспроизводить явление резкого спада пропускной способности

и эффект гистерезиса при переходе к фазе синхронизированного потока. Причина в слишком быстром оттоке автомобилей из образующихся заторов. Внедрение правила медленного старта (англ. *slow-to-start*) помогает сделать скорость оттока ТС из пробки меньше скорости притока.

Набор шагов модели, ограниченной скоростью в 1 ячейку за единицу времени, выглядит следующим образом:

1. Торможение

$$\text{if } v_i(t - 1) > g_i(t - 1) \text{ then } v_i(t) = g_i(t - 1) \quad (21)$$

2. Запаздывающее ускорение

$$\text{if } v_i(t - 1) = 0 \text{ and } g_i(t - 1) \geq 2 \text{ then } v_i(t) = 1 \quad (22)$$

3. Движение

$$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t) \quad (23)$$

Согласно предложенной стратегии декомпозиции и группировки шагов на три этапа представим данную модель в следующем виде:

1. Ускорение

$$v_i(t) = 1 \quad (24)$$

2. Валидация преждевременного ускорения

$$\text{if } v_i(t - 1) = 0 \text{ and } g_i(t - 1) < 2 \text{ then } v_i(t) = 0 \quad (25)$$

3. Валидация столкновения с впереди едущим ТС

$$\text{if } v_i(t) > g_i(t - 1) \text{ then } v_i(t) = g_i(t - 1) \quad (26)$$

4. Движение

$$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t) \quad (27)$$

Стоит отметить, что, как в модели Нагеля-Шрекенберга, присутствует шаг валидации столкновения с впереди едущим ТС.

2.3.4 Многофакторная модель

Данная модель, описанная в работе [9], является компиляцией наиболее интересных частей, рассмотренных выше моделей.

Математическое описание данной модели выглядит следующим образом:

1. Ускорение

if $\xi(t) < p_{sts}$ and $v_i(t - 1) = 0$ and $g_i(t - 1) \leq d_{sts}$ then

$$\begin{aligned} v_i(t) &= 0 \\ v_i(t) &= \min(v_i(t), v_i(t - 1) + 1, v_{max}, \dots \\ &\quad v_{lmax_i}(t - 1), v_{rec_i}(t - 1), v_m(c_i)) \end{aligned} \quad (28)$$

Данный шаг совмещает в себе ускорение, правило медленного старта и валидацию превышения максимально допустимой в данный момент скорости. Здесь и далее p_{sts} — вероятность срабатывания правила медленного старта, d_{sts} — предельная дистанция, при которой правило медленного старта все ещё применимо, v_{lmax_i} — скорость максимально допустимая ПДД, с учетом текущего положения ТС, v_{rec_i} — рекомендуемая скорость, с учетом текущего положения ТС, $v_m(c_i)$ — максимальная скорость, которую может развить данное ТС.

2. Торможение

$$\begin{aligned} b_i(t) &= 0 \\ \text{if } \xi(t) < p_{sa} \text{ and } v_i(t - 1) > 0 \text{ and } v_{i+1}(t - 1) > 0 \text{ and} \\ &\quad g_i(t - 1) \leq d_{sa} \text{ and } (b_{i+1}(t - 1) = 1 \text{ or } v_{i+1}(t - 1) < \\ &\quad\quad v_i(t - 1)) \\ \text{then } v_i(t) &= v_{i+1}(t - 1), b_i(t) = 1 \\ \text{if } v_i(t) > g_i(t - 1) \text{ then } v_i(t) &= g_i(t - 1), b_i(t) = 1 \end{aligned} \quad (29)$$

Здесь и далее p_{sa} — вероятность срабатывания моделируемого в данном шаге правила пространственного упреждения (*spatial anticipation*), d_{sa} — предельная дистанция, при которой правило пространственного упреждения все ещё применимо, b_i — признак включенного стоп сигнала.

3. Случайное замедление

$$\begin{aligned} \text{if } \xi(t) < p \text{ and } (v_i(t - 1) > 1 \text{ or } SSA) \\ \text{then } v_i(t) &= \max(v_i(t) - 1, 0) \end{aligned} \quad (30)$$

На данном шаге моделируется случайное замедление с вероятностью p , а также валидируется снижение скорости до отрицательного значения. В случае, если выставлен флаг *SSA*, то разрешена полная остановка ТС, иначе минимальной скоростью является 1 ячейка за единицу времени.

4. Превышение скорости

$$\begin{aligned} \text{if } \xi(t) < p_s \text{ and } v_i(t-1) = v_{lmax_i}(t-1) \text{ and } v_i(t-1) + \\ 1 < g_i(t-1) \text{ and } v_i(t-1) + 1 \leq v_m(c_i) \text{ then } v_i(t) = \\ v_i(t-1) + 1 \end{aligned} \quad (31)$$

На данном шаге моделируется превышение максимально допустимой скорости, также валидируется превышение новой скоростью значений $v_m(c_i)$ и $g_i(t-1)$.

5. Движение

$$n_i(t) = n_i(t-1) + v_i(t) \quad (32)$$

Рефакторинг данной модели осложняется тем фактом, что все её шаги, за исключением последнего, имеют вероятностный характер, таким образом, нельзя просто разделить шаги изменения скорости и валидации полученного значения, ведь необходимость проведения валидации на данном шаге определяется фактом срабатывания вероятности в нём.

Переработаем первый шаг таким образом, чтобы в нём учитывалось правило медленного старта, а в случае, если оно не было применено, выполнялся шаг классического ускорения. Ограничение полученной скорости выделим в отдельный шаг валидации.

1. Ускорение

$$\begin{aligned} \text{if } \xi(t) < p_{sts} \text{ and } v_i(t-1) = 0 \text{ and } g_i(t-1) \leq d_{sts} \\ \text{then } v_i(t) = 0 \\ \text{else } v_i(t) = v_i(t-1) + 1 \end{aligned} \quad (33)$$

На шаге торможения можно выделить уже встречавшуюся выше проверку того, что полученная на новом шаге скорость не превышает расстояния предыдущего шага до впереди едущего ТС. Вынесем данную валидацию по аналогии с уже рассмотренными моделями.

2. Торможение

$$b_i(t) = 0 \quad (34)$$

if $\xi(t) < p_{sa}$ and $v_i(t - 1) > 0$ and $v_{i+1}(t - 1) > 0$ and
 $g_i(t - 1) \leq d_{sa}$ and ($b_{i+1}(t - 1) = 1$ or $v_{i+1}(t - 1) <$
 $v_i(t - 1)$)

then $v_i(t) = v_{i+1}(t - 1), b_i(t) = 1$

if $v_i(t) > g_i(t - 1)$ then $b_i(t) = 1$

В шаге случайного замедления, исходя из предлагаемого подхода, нет необходимости проверять, что получаемое значение не отрицательно и не произошла запрещенная остановка.

3. Случайное замедление

if $\xi(t) < p$ then $v_i(t) = v_i(t) - 1$ (35)

Валидацию полученной скорости сверху и правило превышения скорости запишем следующим образом:

4. Валидация превышения рекомендованной и максимально допустимой правилами скоростей

$v_i(t) = \min(v_i(t), v_{lmax_i}(t - 1), v_{rec_i}(t - 1))$ (36)

5. Превышение скорости

if $\xi(t) < p_s$ and $v_i(t - 1) = v_{lmax_i}(t - 1)$ (37)

then $v_i(t) = v_i(t - 1) + 1$

6. Валидация превышения максимально допустимой скорости

$v_i(t) = \min(v_i(t), v_{max}, v_m(c_i))$ (38)

7. Валидация снижения скорости до отрицательного значения

if $v_i(t) < 0$ then $v_i(t) = 0$ (39)

8. Валидация остановки

if $v_i(t) = 0$ and $SSA = F$ then $v_i(t) = 1$ (40)

9. Валидация столкновения с впереди едущим ТС

if $v_i(t) > g_i(t - 1)$ then $v_i(t) = g_i(t - 1)$ (41)

10. Движение

$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t)$ (42)

В данном случае для того, чтобы разделить шаги изменения скорости и валидации, потребовалось разбить проверку превышения максимально допустимых скоростей на два этапа:

1. Не была ли на данном участке дороги превышена рекомендуемая или максимально допустимая ПДД скорость движения.
2. Не была ли превышена максимальная или предельная для данного типа ТС скорость.

Анализ и переработка данной модели также позволяет отразить сложность адаптации моделей стохастической природы. Изменение скорости и валидация результата, который будет получен на данном шаге, становятся неразрывны из-за наличия вероятностной составляющей. Соответственно, необходимо обеспечить валидацию только в случае срабатывания правила и никак иначе. В качестве одного из возможных решений можно предложить запоминать значение $\xi(t)$ шага и затем использовать уже рассчитанное значение, а не вычислять его заново.

На основе рассмотренных выше моделей и подходов, использованных для того, чтобы привести их к универсальному представлению, предлагается следующая последовательность действий для данного вида моделей:

1. Выявление шагов, которые одновременно меняют скорость и валидируют полученное значение. Признаком, определяющим шаги подобного рода, является, например, использование функций \min , \max .
2. Разбиение подобного рода шагов на два: изменения скорости и валидации полученного значения

Принимая тот факт, что каждая конкретная вероятностная переменная после первого расчета остается постоянной в течение такта работы автомата, получаем одинаковую последовательность действий, как для стохастических, так и для не стохастических моделей.

Проанализировав рассматриваемые модели, удалось выявить следующие ключевые особенности:

1. Все модели имеют один или более шагов изменения скорости.

2. Ограничительные функции, используемые совместно с изменением скорости, можно выделить в шаги валидации.
3. Представление всех моделей поддается унификации без изменения их поведения, как и предполагает подход рефакторинга.
4. Практически во всех моделях можно выделить общий шаг валидации столкновения с едущим впереди ТС.
5. В том или ином виде практически в любой модели присутствует валидация превышения скорости и валидация снижения скорости до отрицательного значения.
6. Последний шаг всех моделей — шаг движения.

Результатом декомпозиции и анализа становится разбиение шагов представления математических моделей транспортных потоков на основе клеточного автомата на три типа: изменение скорости, валидация, движение.

Важно отметить, что в общем случае в результате декомпозиции и приведения модели к единообразному представлению увеличивается количество шагов.

Еще одной особенностью применения к моделям транспортных потоков на основе ТКА описанного рефакторинга является потеря компактности записи законов их функционирования, однако в то же время появляется универсальный язык записи подобного рода моделей и улучшается восприятие особенностей той или иной модели, в том числе за счет выделения общих шагов.

Безусловно, нельзя утверждать, что рассматриваемый подход рефакторинга представления математических моделей транспортного потока на основе ТКА применим и оправдан во всех случаях, однако он является хорошей отправной точкой для дальнейших исследований по приведению моделей рассматриваемой группы к одному общему виду и разделяемой всеми терминологии.

2.4 Четырехступенчатое унифицированное представление моделей транспортных потоков на основе клеточного автомата

Рассматривая выявленные общие закономерности и шаги моделей, в целом можно говорить о разбиении шагов моделей рассматриваемой группы на четыре типа: изменение скорости, валидация, движение, оповещение.

Отталкиваясь от рассмотренных случаев, в результате проведенных декомпозиции и анализа формулируется четырехступенчатое унифицированное представление математических моделей транспортных потоков на основе ТКА. Ступенями данного представления являются четыре рассмотренных выше типа шагов.

По сути своей, данное представление накладывает жесткое ограничение на то, что указанные четыре ступени должны идти в строго определенном порядке. То есть сначала идут все шаги, изменяющие значение скорости, затем должна идти группа шагов валидации полученных значений на предмет того, что состояние модели не является противоречивым, после того, как состояние модели было по необходимости исправлено, необходимо выполнить все заданные действия по оповещению других участников движения об изменениях в состоянии текущего ТС, и последней группой всегда будет идти вырожденная ступень из одного шага движения. Пример подобных последовательных ступеней представлен на рис. 2.2.

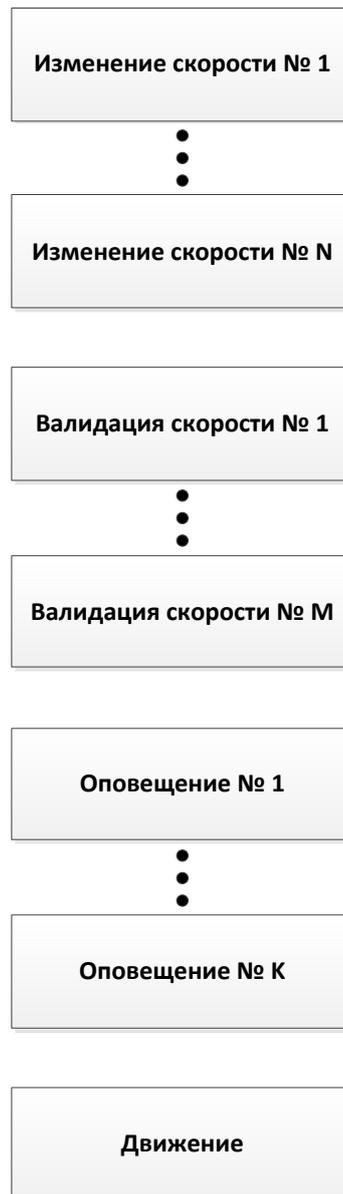


Рис. 2.2 Четырёхступенчатое унифицированное последовательное представление

В общем случае группы валидации и оповещения могут не содержать шагов, что справедливо, в частности, для простых фундаментальных моделей.

Однако налагая жесткое ограничение на то, что шаги различных типов не могут идти вперемешку, мы лишаем самих себя необходимой гибкости. Ослабив это правило, в результате мы получаем ситуацию, отраженную на рис. 2.3. На этом рисунке представлен довольно общий случай, когда вслед за шагом изменения скорости может сразу же идти шаг валидации полученного значения. Это возможно, когда шаги стохастические, и инварианты поведения модели заставляют осуществлять валидацию непосредственно после интересующего шага изме-

нения скорости, а не после всех шагов. Соответственно, в общем случае шаги могут идти в произвольном порядке, однако касательно шагов оповещения все же логично располагать их после всех шагов изменения скорости и валидации, потому что они должны работать с результирующей скоростью, а не с ее промежуточным значением.

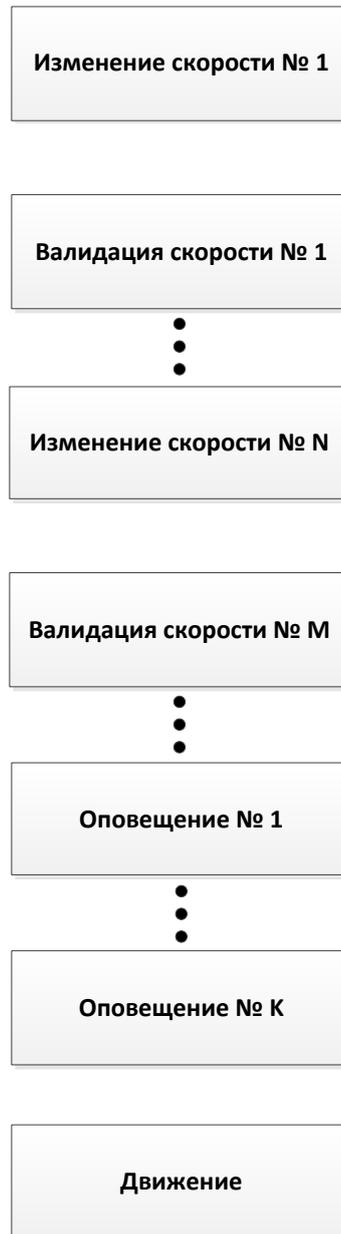


Рис.2.3. Четырёхступенчатое унифицированное представление с перемешанными шагами

На примере данного шага, который, по сути, оповещает других участников движения о том, что происходит снижение скорости, вводится новый общий тип шагов для моделей автотранспортных потоков на основе ТКА. Новый тип шагов

объединяет шаги оповещения и сигнализации, которые могут быть использованы для моделирования обмена информацией ТС о своих намерениях или об изменении состояния текущего ТС с другими участниками движения. Помимо шага оповещения о включении стоп-сигнала, направлением будущих исследований будет являться ввод в модели оповещения о желании сменить полосу движения и ожидания ответной реакции от едущих впереди ТС.

В результате введения нового типа шагов, трехступенчатое унифицированное представление математических моделей транспортных потоков на основе ТКА преобразуется в четырехступенчатое. Результирующий же набор типов шагов будет выглядеть следующим образом: изменение скорости, валидация, оповещение, движение.

2.5 Мотивации смены полосы движения

Исходя из приведенного в главе 1 анализа математических моделей транспортного потока, рассмотренных фундаментальных моделей, а также новых моделей рассматриваемой группы, четко видно, что разнообразие разработок, а также их уровень весьма высок. Однако в рассматриваемой области моделирования транспорта существует недостаток хорошо проработанных моделей принятия решения о необходимости смены полосы движения, базирующихся на ТКА.

Хотя необходимость учитывать динамику перестроения и напрашивается, как очевидная, существуют исследования, в которых данный фактор вычеркивается из необходимых для реалистичного моделирования. Причиной для такого решения является малое воздействие на ключевые параметры транспортного потока в целом, например, эти высказывания можно встретить в работе [66]. И все же, трудно согласиться с такой точкой зрения, когда она высказывается применительно к моделированию бесконечной однополосной дороги, поэтому автор данной диссертационной работы считает моделирование перестроений ТС во время движения важной составляющей реалистичного моделирования.

Основной порядок работы моделей транспортного потока на основе ТКА имеет следующие основные шаги:

- Рассчитать наиболее приемлемый и выгодный (могут использоваться разные критерии оптимальности) путь из точки А в точку Б.
- Выбор направления для следующего такта работы автомата.

Как уже было показано выше, работа моделей рассматриваемой группы состоит из шагов следующих типов:

- ускорение;
- торможение;
- случайные возмущения;
- движение.

Одна из ранних и наиболее интересных работ, носящая целостный характер и анализирующая предыдущие наработки, касающаяся тематики перестроений для моделей на основе ТКА датируется 1996 и выполнена применительно к немецким магистралям [109]. В этой статье набор правил смены полосы движения подстраивается под необходимость воспроизвести макрохарактеристики транспортного потока, а возможность получить реалистичные правила микроуровня выносятся за рамки работы. Важным аспектом работы является то, что она показывает необходимость учитывать возможность перестроения на соседнюю полосу, не создавая помехи ТС двигающимся позади. В конце же постулируется, что многополосная модель транспортного потока куда сложнее, чем однополосная.

Одна из наиболее новых и интересных работ в этом направлении по мотивациям смены полосы движения описана в статье [9]. Это довольно простая модель, но в целом позволяющая воспроизводить базовые сценарии поведения при принятии рассматриваемого выбора о необходимости сменить полосу водителем ТС. В любом случае эта модель может являться основой для построения модели, включающей в себя больше реальных мотиваций. Основными недостатками этой модели являются:

- Необходимость сменить полосу движения текущего ТС определяется только лишь наличием медленного ТС впереди или же лучшего дорожного покрытия на соседней полосе.
- Вероятность срабатывания правил для рассматриваемой модели одинакова для всех мотиваций, что, в принципе, не совсем соответствует действительности.

Исходя из недостатков рассмотренной модели, необходимости и потенциала к созданию модели смены полосы движения с реалистичными правилами функционирования и, возможно, потенциалом к расширению набора учитываемых мотиваций, существует необходимость в создании модели с более глубокой проработкой для принятия решения водителя ТС о смене полосы движения.

2.5.1 Новый набор мотиваций смены полосы движения

Во время движения водители сталкиваются с большим разнообразием ситуаций, которые побуждают или же принуждают их к смене полосы движения. Такие факторы, как качество дорожного покрытия на соседних полосах движения, объединённые с опытом водителей проезда по дорогам, зачастую являются самой распространённой причиной не самого логичного перестроения, например, с точки зрения правил дорожного движения. Объезд ям на дорогах сейчас превалирует среди других причин смены полосы движения, это продиктовано довольно плачевным состоянием дорожного покрытия во многих регионах России.

Помимо вопросов качества дорожного покрытия на принятие решения о необходимости перестроиться влияют разрешенные направления движения по полосам, а также направление движения водителей. Например, если текущая полоса не позволяет осуществить на ближайшем перекрестке поворот, то необходимо перестроиться в полосу движения, которая позволяет осуществить желаемый маневр.

Кроме необходимости осуществить поворот, также существенен случай, когда на перекрестке необходимо проехать прямо. Водители имеют склонность выбирать полосы с движением только прямо или прямо и направо в случае, если им

не нужно осуществлять поворот на ближайшем перекрестке. Это объясняется тем, что полосы, где разрешен поворот налево и движение прямо, медленнее пропускают поток на перекрестке за счет необходимости пропустить встречный поток при повороте налево.

Помимо качества дорожного покрытия и возможностей направления движения по полосам, важным фактором также является наличие медленного автомобиля впереди и плотность движения по полосам. Водители предпочитают двигаться с максимально возможной скоростью, поэтому полоса с меньшей плотностью движения или же более высокой средней скоростью будут более предпочтительны.

Имея набор общих мотиваций смены полосы движения для среднестатистического водителя, формализуем эти правила для последующего моделирования. Важно также учитывать стохастическую природу принятия решения о перестроении. Например, водитель может просто забыть осуществить запланированный поворот налево на перекрестке, и тогда ему придётся осуществлять этот манёвр уже на следующем пересечении и корректировать маршрут соответствующим образом.

Представленные ниже результаты исследований перестроений ТС были опубликованы в следующих работах [24, 96].

Предложим новый набор мотиваций смены полосы движения:

1. В случае если дистанция до впереди едущего ТС меньше, чем скорость текущего ТС, и разница скоростей больше, чем дистанция принятия решения.

$$g_i(t - 1) < v_i(t - 1) \ \& \ v_i(t - 1) - v_{i+1}(t - 1) > v_{dif} \quad (1)$$

$v_{i+1}(t - 1)$ — возвращает скорость впереди едущего ТС на той же полосе движения.

v_{dif} — дистанция принятия решения.

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменные LTR1 и RTR1 устанавливаются.

В рассматриваемом контексте LTR означает — Left Turn Required (поворот налево необходим), а RTR означает — Right Turn Required (поворот направо необходим), соответственно.

2. В случае если качество дорожного покрытия на соседней полосе лучше, чем на текущей.

Следующая формула реализует проверку для левой ближайшей полосы:

$$\begin{aligned} q_s(m_i(t-1) - 1, n_i(t-1), d_q) \\ > q_s(m_i(t-1), n_i(t-1), d_q) \end{aligned} \quad (2)$$

$m_i(t-1)$ — возвращает индекс полосы движения для текущего ТС.

$n_i(t-1)$ — возвращает индекс ячейки полосы движения для текущего ТС.

d_q — дистанция контроля качества дорожного покрытия.

q_s — возвращает показатель качества дорожного покрытия с позиции текущего ТС на дистанции d_q .

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, переменная LTR2 устанавливается.

Следующая формула реализует проверку для правой ближайшей полосы:

$$\begin{aligned} q_s(m_i(t-1) + 1, n_i(t-1), d_q) \\ > q_s(m_i(t-1), n_i(t-1), d_q) \end{aligned} \quad (3)$$

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная RTR2 устанавливается.

3. В случае если существует необходимость повернуть на ближайшем пересечении проезжих частей, но текущая полоса движения не позволяет осуществить желаемый поворот, и дистанция до перекрестка меньше, чем дистанция принятия решения.

Следующая формула реализует проверку для необходимости осуществить поворот налево:

$$TL \ \& \ c_i(t-1) < d_c \ \& \ a_{it}(m_i(t-1), n_i(t-1)) == F \quad (4)$$

TL — необходимость осуществить поворот налево.

$c_i(t-1)$ — возвращает дистанцию до ближайшего перекрестка.

d_c — дистанция принятия решения перед перекрестком.

a_{lt} — проверяет, что поворот налево разрешен.

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная LTR3 устанавливается.

Следующая формула реализует проверку для необходимости осуществить поворот направо:

$$TR \ \& \ c_i(t - 1) < d_c \ \& \ a_{rt}(m_i(t - 1), n_i(t - 1)) == F \quad (5)$$

TR — необходимость осуществить поворот направо.

a_{rt} — проверяет, что поворот направо разрешен.

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная RTR3 устанавливается.

4. В случае если существует необходимость повернуть на ближайшем пересечении проезжих частей, на соседней полосе движения плотность ТС меньше, соседняя полоса позволяет осуществить желаемый поворот, и дистанция до ближайшего перекрестка меньше, чем дистанция принятия решения.

Следующая формула реализует проверку для необходимости осуществить поворот налево:

$$\begin{aligned} TL \ \& \ c_i(t - 1) \\ < d_c \ \& \ a_{lt}(m_i(t - 1) \\ & - 1, n_i(t - 1)) \ \& \ p(m_i(t - 1), n_i(t - 1)) \\ & - p(m_i(t - 1) - 1, n_i(t - 1)) > p_{dif} \end{aligned} \quad (6)$$

p — возвращает плотность ТС полосы относительно позиции текущего ТС.

p_{dif} — нижняя граница разницы плотностей.

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная LTR4 устанавливается.

Следующая формула реализует проверку для необходимости осуществить поворот направо:

$$\begin{aligned}
TR \& c_i(t - 1) \\
&< d_c \& a_{rt}(m_i(t - 1) \\
&+ 1, n_i(t - 1)) \& p(m_i(t - 1), n_i(t - 1)) \\
&- p(m_i(t - 1) + 1, n_i(t - 1)) > p_{dif}
\end{aligned} \tag{7}$$

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная RTR4 устанавливается.

5. В случае если необходимость повернуть куда-либо отсутствует, текущая полоса движения позволяет осуществлять поворот налево, и дистанция до ближайшего перекрестка меньше, чем дистанция принятия решения, то лучше сменить текущую полосу движения на ближайшую правую.

$$\begin{aligned}
TL == F \& TR = \\
= F \& a_{lt}(m_i(t - 1), n_i(t - 1)) \& c_i(t - 1) \\
&< d_c
\end{aligned} \tag{8}$$

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная RTR5 устанавливается.

6. В случае если на текущей полосе движения существует препятствие, дистанция до него меньше, чем дистанция контроля качества дорожного покрытия, и для соседней полосы препятствие дальше либо же отсутствует вовсе.

Следующая формула реализует проверку для левой ближайшей полосы:

$$\begin{aligned}
q_s(m_i(t - 1), n_i(t - 1), d_q) == 0 \& n_b(m_i(t - 1), n_i(t - \\
1), d_q) < n_b(m_i(t - 1) - 1, n_i(t - 1), d_q)
\end{aligned} \tag{9}$$

n_b — возвращает дистанцию до ближайшего препятствия.

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная LTR6 устанавливается.

Следующая формула реализует проверку для правой ближайшей полосы:

$$\begin{aligned}
q_s(m_i(t - 1), n_i(t - 1), d_q) == 0 \& n_b(m_i(t - 1), n_i(t - 1), d_q) < \\
n_b(m_i(t - 1) + 1, n_i(t - 1), d_q)
\end{aligned} \tag{10}$$

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная RTR6 устанавливается.

Все рассмотренные мотивации смены полосы движения необходимо анализировать вместе, потому что одновременно условия нескольких из них могут быть выполнены, и в таком случае результирующая вероятность смены полосы движения текущим ТС должна быть максимальной из вероятностей применения всех сработавших мотиваций.

2.5.2 Классификация мотиваций смены полосы движения

Соответственно, с одной стороны, объявление своей собственной вероятности для каждой мотивации выглядит логичным, но с другой стороны, применение этого решения выливается во множество вероятностных параметров даже для однонаправленной многополосной модели. Если же речь идет о сложной модели для обширной топологии УДС, то в таком случае количество различных параметров и вероятностей будет чрезмерно, например, для эффективного применения алгоритмов машинного обучения.

Таким образом, необходимо уменьшить количество стохастических параметров модели настолько, насколько это возможно, в данном случае — с шести до меньшего числа. Для того чтобы достичь поставленной цели, введём разделение мотиваций по степени необходимости осуществить маневр перестроения на следующие три группы:

1. желательно: 1, 2, 4, 5;
2. необходимо: 3;
3. крайне необходимо: 6.

Таким образом, удастся уменьшить количество стохастических параметров с шести до трёх. Первая группа обладает наименьшей вероятностью срабатывания своих правил, в то время как последняя, соответственно, наивысшей. Важным преимуществом подобного разбиения на группы является тот факт, что оно поз-

воляет сводить любое количество вероятностных переменных к трём, что, несомненно, ведет к упрощению работы с моделью.

2.5.3 Алгоритмы анализа сработавших мотиваций

Для того чтобы получить результирующую вероятность и направление для первой группы мотиваций, необходимо следовать следующему алгоритму действий:

В случае срабатывания первой или второй мотивации возможен вариант, когда приемлем как поворот налево, так и направо, или даже в обоих направлениях с вероятностью первой группы.

При срабатывании четвертой мотивации используется логика, рассмотренная для предыдущего случая, но с более высокой вероятностью, например 1,1 от базовой вероятности первой группы.

В случае срабатывания пятой мотивации, и если необходимость поворота направо уже была выставлена, то результирующим направлением первой группы будет поворот направо. Если же необходимость поворота направо не была выставлена на предыдущих шагах, то просто выставляем необходимость поворота направо. В обоих случаях в качестве результирующей вероятности осуществления маневра должен браться максимум среди вероятностей маневра, рассчитанный до этого, с базовой вероятностью первой группы.

Для того чтобы получить результирующую вероятность и направление для второй и третьей группы мотиваций, необходимо следовать следующему алгоритму действий:

В случае если правило группы мотиваций сработало, то необходимо установить результирующую вероятность как базовую вероятность соответствующей группы.

Заключительные общие шаги для всех групп:

В случае если как поворот налево, так и поворот направо приемлемы, то в качестве результирующего направления движения необходимо установить, что допустим поворот налево или направо.

В случае если существует только одно допустимое направление поворота, то необходимо установить его в качестве результирующего направления поворота.

2.5.4 Результирующее направление и вероятность

После расчёта результирующего направления и вероятности для каждой из трех групп мотиваций, необходимо рассчитать окончательное направление и вероятность совершения маневра перестроения. Схема алгоритма представлена на рис. 2.4, описание алгоритма выглядит следующим образом:

Проходя от группы с максимальной степенью необходимости совершения маневра к группе с наименьшей необходимостью, прежде всего, необходимо проверить случай, когда в результате получено только одно приемлемое направление перестроения. Если это так, то это направление и будет результирующим направлением смены полосы движения. Если же оба направления смены полосы движения приемлемы, то необходимо проверить группы с более низким приоритетом на наличие в них усиливающей необходимости перестроится в одну из сторон. Если такое усиление существует, то это и будет результирующее направление смены полосы движения.

В конце концов, если все же получилось так, что оба направления перестроения являются приемлемыми, то необходимо выбрать результирующее направление смены полосы движения, используя какой-либо подход, позволяющий избежать конфликта, например из работы [9].

Например, в случае если в третьей группе мотиваций не было получено требований по осуществлению перестроения, но они были получены во второй группе, то необходимо установить результирующую вероятность равной вероятности

второй группы и также проверить, нужно ли проводить анализ сработавших в первой группе мотивации.

В случае если во второй группе допустимы оба направления смены полосы движения, а в первой группе было выставлено только одно усиливающее направление перестроения, то это и будет результирующее направление смены полосы движения.

Если же для второй группы было выставлено только одно возможное направление перестроения, то оно и будет результирующим направлением смены полосы движения.

Если же все-таки в результате осталось два приемлемых направления, то, как и ранее, необходимо использовать подход, позволяющий избежать конфликта.

Условные обозначения, использованные на рис. 2.4:

- LTR_d — необходимость перестроиться на левую полосу для группы 1;
- RTR_d — необходимость перестроиться на правую полосу для группы 1;
- LTR_c — необходимость перестроиться на левую полосу для группы 2;
- RTR_c — необходимость перестроиться на правую полосу для группы 2;
- LTR_vc — необходимость перестроиться на левую полосу для группы 3;
- RTR_vc — необходимость перестроиться на правую полосу для группы 3;
- RES_dest — результирующее направление перестроения;
- LT — ближайшая левая полоса движения;
- RT — ближайшая правая полоса движения;
- RES_prob — результирующая вероятность перестроения;
- Rand — функция выбора ближайшей полосы для перестроения, позволяющая избежать конфликта.

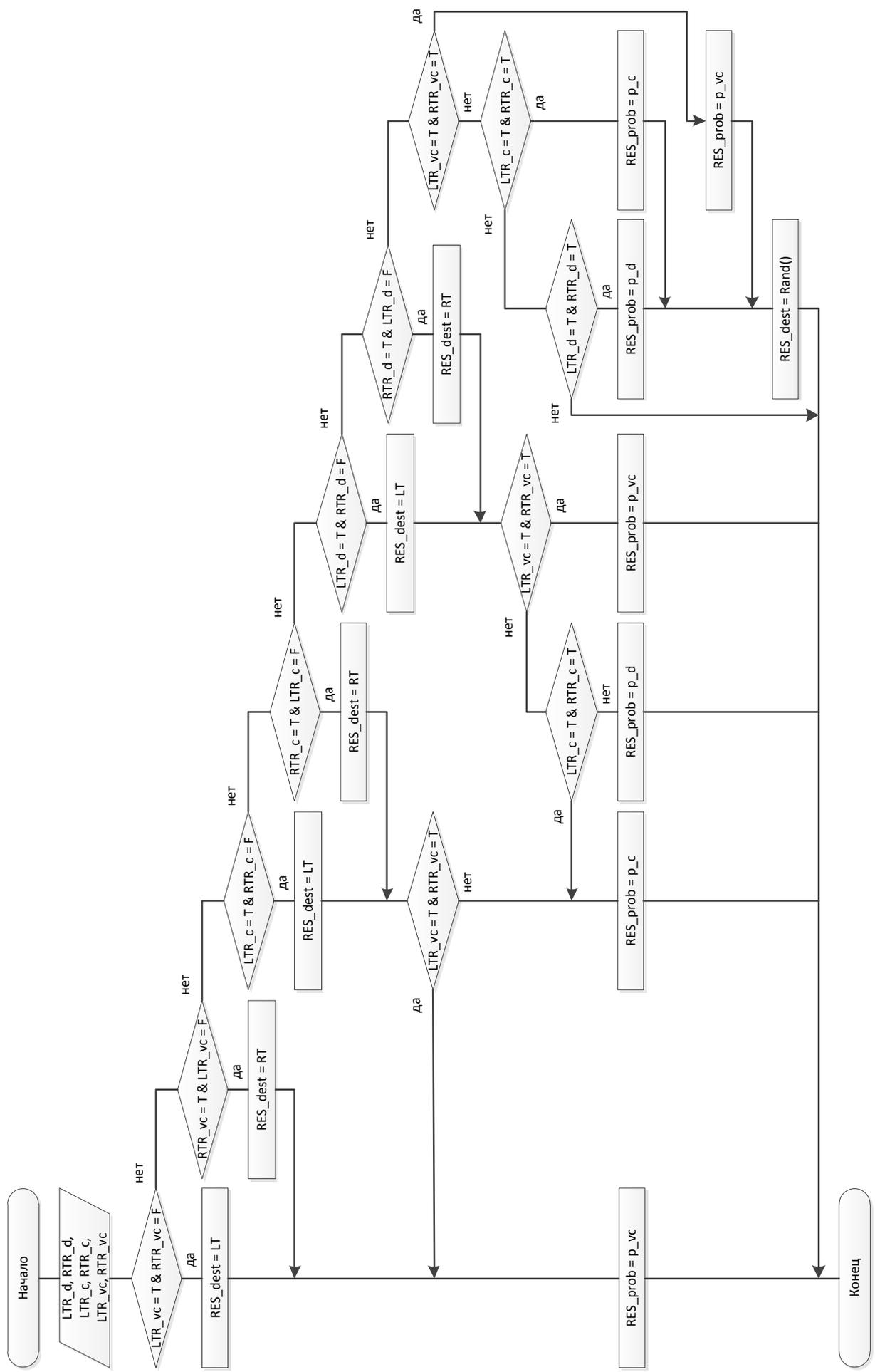


Рис. 2.4. Схема алгоритма определения результирующего направления и вероятности

2.5.5 Заключение и направление будущих исследований

Результатом применения изложенных мотиваций смены полосы движения, их групп и общих правил является вычисление результирующего направления и вероятности выполнения маневра водителем ТС.

За счет введения разбиения мотиваций на группы по степени необходимости осуществления маневра, удастся достигнуть снижения количества стохастических параметров до фиксированного числа, что, как минимум, упрощает калибровку модели по экспериментальным данным, а также позволяет говорить о потенциально более простом использовании данной модели в процессе машинного обучения по историческим данным. Также разбиение на группы позволяет абстрагироваться от каждой конкретной мотивации и вести анализ и работу на более абстрактном уровне групп.

Рассмотренные алгоритмы определения результирующего направления маневра и вероятности его осуществления позволяют на примерах конкретных ситуаций перейти к общему алгоритму работы с представленными группами мотиваций по общим правилам, в независимости от количества правил в каждой из групп, их особенностей и сложности описания.

Проанализировав рассмотренные подходы, приходим к выводу, что получение направления и вероятности осуществления маневра смены полосы движения для каждого ТС происходит следующим образом:

- Определение сработавших мотиваций смены текущей полосы движения ТС.
- Расчет направлений и вероятностей для каждой сработавшей группы в отдельности.
- Расчет результирующего направления и вероятности осуществления маневра смены текущей полосы движения ТС.
- Определение осуществимости необходимого маневра.

- В случае если согласно рассчитанной вероятности маневр необходимо осуществить, то выполнить смену полосы движения текущего ТС, согласно необходимому направлению перестроения.

В качестве дальнейшего направления работы по моделированию динамики перестроений для моделей транспортного потока на основе ТКА можно рассматривать расширение предложенного набора базовых мотиваций смены полосы движения. Также при увеличении количества и изменении структуры групп рассмотренных мотиваций необходимо адаптировать описанные алгоритмы определения результирующего направления движения и вероятности осуществления маневра перестроения, если в этом есть смысл с точки зрения потенциально более комфортной ситуации на соседней полосе движения, или же если этот маневр необходим в связи с невозможностью продолжать движение в желаемом направлении на текущей полосе.

Помимо расширения возможностей, заложенных в базовой модели, также необходимо осуществлять контроль и сравнение адекватности экспериментальных данных с теми, что были получены в результаты моделирования.

2.6 Однополосная однонаправленная модель передвижения

В статье [23] было продемонстрировано, каким образом можно применить рефакторинг для некоторых моделей транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов (ТКА), чтобы привести их к общему унифицированному представлению. В частности, было преобразовано представление многофакторной модели, описанной в статье [9]. После переработки данной модели удалось значительно упростить анализ алгоритма её работы и выявить шаги, поведение которых представляется возможным усовершенствовать, чтобы добиться большей реалистичности результатов моделирования [95].

2.6.1 Параметры модели и условные обозначения

Положим, что у нас есть двухмерная матрица L , которая состоит из ячеек фиксированной длины. Параметры M и N определяют высоту (количество полос движения) и ширину (длину дороги) матрицы соответственно. В любой момент времени каждая ячейка может быть либо свободной, либо занятой транспортным средством (ТС). Длина каждого ТС может варьироваться и быть больше или равной одной ячейке.

Время t дискретно и имеет шаг, равный 1 секунде, что приблизительно равно среднему времени реакции водителя. Позиция i -го ТС определяется переменными m_i и n_i , где m_i определяет полосу движения, а n_i определяет порядковый номер ячейки в этой полосе.

Скорость v_i измеряется в ячейках, пройденных за временной шаг, который, как было указано ранее, равен 1 секунде.

Здесь и далее используются следующие условные обозначения:

- t — текущий такт работы автомата;
- $t - 1$ — предыдущий такт работы автомата;
- v_i — функция, возвращающая скорость i -го ТС;
- g_i — функция, возвращающая расстояние от i -го ТС до едущего впереди;
- v_{max} — максимально допустимая скорость ТС;
- v_{lmax_i} — скорость максимально допустимая ПДД;
- $v_m(c_i)$ — максимальная скорость, которую может развить данное ТС;
- v_{rec_i} — рекомендуемая скорость, с учетом текущего положения ТС;
- ξ — случайная величина, распределенная равномерно;
- p — вероятность срабатывания правила случайного замедления;
- p_s — вероятность срабатывания правила превышения скорости;
- p_{sts} — вероятность срабатывания правила медленного старта;
- d_{sts} — предельная дистанция, при которой правило медленного старта все ещё применимо;

- p_{sa} — вероятность срабатывания, моделируемого в данном шаге, правила пространственного упреждения (*spatial anticipation*);
- d_{sa} — предельная дистанция, при которой правило пространственного упреждения все ещё применимо;
- b_i — признак включенного стоп-сигнала;
- SSA — определяет возможность полной остановки ТС;

2.6.2 Переход к шагу с адаптивным торможением

Приведем первоначальное представление многофакторной модели, полученное в статье [23].

1. Ускорение

$$\begin{aligned} &\text{if } \xi(t) < p_{sts} \text{ and } v_i(t-1) = 0 \text{ and } g_i(t-1) \leq d_{sts} \\ &\quad \text{then } v_i(t) = 0 \\ &\quad \text{else } v_i(t) = v_i(t-1) + 1 \end{aligned} \quad (1)$$

2. Торможение

$$\begin{aligned} &b_i(t) = 0 \\ &\text{if } \xi(t) < p_{sa} \text{ and } v_i(t-1) > 0 \text{ and } v_{i+1}(t-1) > 0 \text{ and} \\ &\quad g_i(t-1) \leq d_{sa} \text{ and } (b_{i+1}(t-1) = 1 \text{ or } v_{i+1}(t-1) < \\ &\quad \quad v_i(t-1)) \\ &\quad \text{then } v_i(t) = v_{i+1}(t-1), b_i(t) = 1 \\ &\quad \text{if } v_i(t) > g_i(t-1) \text{ then } b_i(t) = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

3. Случайное замедление

$$\text{if } \xi(t) < p \text{ then } v_i(t) = v_i(t) - 1 \quad (3)$$

4. Валидация превышения рекомендованной и максимально допустимой правилами скоростей

$$v_i(t) = \min(v_i(t), v_{lmax_i}(t-1), v_{rec_i}(t-1)) \quad (4)$$

5. Превышение скорости

$$\begin{aligned} &\text{if } \xi(t) < p_s \text{ and } v_i(t-1) = v_{lmax_i}(t-1) \\ &\quad \text{then } v_i(t) = v_i(t-1) + 1 \end{aligned} \quad (5)$$

6. Валидация превышения максимально допустимой скорости

$$v_i(t) = \min(v_i(t), v_{max}, v_m(c_i)) \quad (6)$$

7. Валидация снижения скорости до отрицательного значения

$$\text{if } v_i(t) < 0 \text{ then } v_i(t) = 0 \quad (7)$$

8. Валидация остановки

$$\text{if } v_i(t) = 0 \text{ and } SSA = F \text{ then } v_i(t) = 1 \quad (8)$$

9. Валидация столкновения с впереди едущим ТС

$$\text{if } v_i(t) > g_i(t - 1) \text{ then } v_i(t) = g_i(t - 1) \quad (9)$$

10. Движение

$$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t) \quad (10)$$

Представленная модель объединяет в себе классическую однонаправленную многополосную модель передвижения, правило медленного старта [98], правило пространственного упреждения [67], случайное превышение скорости, а также ограничения предельно допустимой скорости (v_{max} , v_{lmax_i} , $v_m(c_i)$, v_{rec_i}).

2.6.3 Введение шага адаптивного торможения

Существенный недостаток данной модели — это шаг торможения. Основной причиной является то, что снижение скорости до скорости впереди едущего ТС происходит мгновенно и лишь в пределах дистанции реакции водителя на торможение лидера d_{sa} .

Возможна ситуация, при которой впереди едущий автомобиль снижает скорость, но все же движется быстрее текущего ТС, тогда произойдёт ненужная адаптация скорости до большей с последующим включением сигнала торможения b_i .

Формально данная модель использует стоп-сигнал b_i , но по факту это не классический стоп-сигнал во время торможения, это некий аналог, который в данном случае сигнализирует об адаптации скорости к скорости лидера.

В этой ситуации одним из сравнительно несложных и эффективных способов модернизации является переработка шага торможения. Основной задачей, ко-

тору необходимо решить в данном случае, является реализация адекватного снижения скорости в ответ на стоп-сигнал впереди едущего ТС. С позиции реального дорожного движения это будет аналог постепенного снижения скорости с плавным сокращением дистанции до лидера.

Введем обозначение v_{dif_i} , которое будет выражать разницу скоростей текущего и впереди едущего ТС.

$$v_{dif_i} = v_i(t) - v_{i+1}(t) \quad (11)$$

Чтобы рассчитать количество тактов работы модели, при котором исключено столкновение с впереди едущим ТС, необходимо дистанцию до лидера g_i поделить на разницу скоростей v_{dif_i} и округлить до меньшего целого. Введем функцию Z_i , возвращающую количество тактов без конфликта.

$$Z_i = \left\lfloor \frac{g_i(t)}{v_{dif_i}(t)} \right\rfloor \quad (12)$$

Теперь, зная дистанцию до впереди едущего ТС v_{dif_i} и количество тактов движения без столкновения Z_i при сохранении текущей скорости, мы можем получить, насколько необходимо снизить скорость в текущем такте, чтобы за Z_i -тактов снизить скорость до скорости лидера. Данное значение снижения скорости можно рассчитать, как отношение разницы скоростей $v_{dif_i}(t - 1)$ к количеству тактов без конфликтов $Z_i(t - 1)$.

$$\frac{v_{dif_i}(t - 1)}{Z_i(t - 1)} \quad (13)$$

Таким образом, изменение скорости в шаге торможения, при условии срабатывания предусловия, можно записать следующим образом

$$v_i(t) = v_i(t - 1) - \left\lfloor \frac{v_{dif_i}(t - 1)}{Z_i(t - 1)} K_{agr} \right\rfloor \quad (14)$$

В данном случае K_{agr} — коэффициент агрессивности торможения.

В целом же теперь шаг торможения будет выглядеть следующим образом

$$\text{if } \xi(t) < p_{sa} \text{ and } g_i(t - 1) \leq d_{sa} \text{ and } (b_{i+1}(t - 1) = 1 \text{ or } v_{dif_i}(t - 1) > 0) \text{ and } 0 < Z_i(t - 1) < Z_{upper} \quad (15)$$

$$\text{then } v_i(t) = v_i(t - 1) - \left\lfloor \frac{v_{dif_i}(t-1)}{Z_i(t-1)} K_{agr} \right\rfloor$$

В данном случае Z_{upper} — верхний предел количества тактов без конфликта, свыше которого торможение не целесообразно.

Помимо изменения формулы расчета новой скорости, в качестве ответной реакции на торможение лидера из логического предусловия были убраны излишние проверки ненулевой скорости текущего ТС и лидера.

Теперь необходимо оповещать ТС позади текущего о том, что скорость была снижена по сравнению с предыдущим тактом работы автомата.

Добавим перед шагом движения шаг оповещения о включении стоп-сигнала:

$$\begin{aligned} \text{if } v_i(t) < v_i(t - 1) \\ \text{then } b_i(t) = 1 \\ \text{else } b_i(t) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Таким образом, на примере переработанного представления однополосной однонаправленной многофакторной модели транспортного потока был усовершенствован шаг торможения, его работа стала более плавной и похожей на то, как действуют водители во время торможения. Введены такие понятия, как количество тактов без конфликтов Z_i , коэффициент агрессивности торможения K_{agr} . Также была выведена формула (14), обеспечивающая плавное снижение скорости в ответ на торможение впереди едущего ТС в пределах дистанции принятия решения. Ответные действия в виде снижения скорости несут стохастический характер, а также не принимаются при условии, когда ещё имеется достаточное количество тактов движения без конфликта, которое определяется параметром Z_{upper} .

Таким образом, был предложен новый шаг торможения, также был изменен смысл сигнала b_i , в частности от псевдо стоп-сигнала удалось перейти к моделированию реального стоп-сигнала, включающегося при снижении скорости, и реакции на него транспортного потока.

На примере стоп-сигнала для универсального представления математических моделей транспортных потоков на основе КА был сформулирован четвертый тип шагов — оповещение или же сигнализация.

2.7 Моделирование работы перекрестка

В качестве базового варианта пересечения проезжей части используется крестообразный перекресток. С каждой стороны перекрестка примыкает одна или две дороги (случай только одностороннего движения и двухстороннего).

В качестве переменных, отображающих желание водителя осуществить поворот направо или налево, выступают описанные ранее RTR и LTR. Если обе переменные не установлены в конце цикла работы автомата, то необходимость осуществить поворот на ближайшем перекрестке отсутствует.

Для моделирования топологий могут использоваться два варианта перекрестков: регулируемый и нерегулируемый (сюда же подпадает ночной режим работы светофоров).

Приоритеты пропуска транспортных потоков совпадают с приоритетами, изложенными в ПДД.

При наличии конфликтов во время поворота налево маневр осуществляется всегда, если впереди на достаточно большой дистанции нет ТС, двигающегося по встречному направлению и обладающему приоритетом по сравнению с текущим ТС. При высоких значениях интенсивности дорожного движения на моделируемом пересечении ситуация с комфортной дистанцией впереди зачастую недостижима. Поэтому для того, чтобы не допустить образования ситуации, при которой невозможно смоделировать реалистичный пропуск ТС на перекрестке, необходимо использовать вероятностную модель, которая в случае срабатывания вероятности, будет вынуждать ТС пересекать перекресток даже в случае конфликта с ТС, двигающимся по встречному направлению.

2.8 Объединение моделей в единую систему для создания топологий

Моделирование работы целостной и изолированной части топологии УДС города требует наличия следующих разработанных моделей:

1. модель передвижения многополосной однонаправленной дороги;
2. модель мотиваций смены полосы движения;
3. модель работы перекрестка.

При наличии перечисленных моделей следующей частью решаемой задачи является разработка формата описания моделируемой топологии, ее основных характеристик, задания всех необходимых вероятностных переменных и т.д.

В работе [9] в качестве основы для построения подобного формата выбран язык XML, однако формат представления данных JSON, пришедший из сферы Web-разработки, можно считать более предпочтительным, по причине его простоты и отсутствия излишней громоздкости, которая присуща XML. В то же время использование формата JSON по умолчанию оказывается более полезным при отделении рассматриваемого комплексного решения в качестве облачного Интернет-сервиса. Основные идеи и мотивации к реализации такого рода решения описаны в работе [25].

Для моделирования больших топологий, например, целого района или же города, не обойтись без использования кластеров вычислительных узлов и способа синхронизации обработки результатов их работы. Для моделей рассматриваемой группы возможны различные способы распределения отдельных частей топологии между вычислительными узлами кластера. Основной идеей является то, что ТС передаются между частями топологии. За счет подобного распределения нагрузки достигается возможность работать с обширными топологиями, что позволяет получать комплексный результат моделирования взаимосвязанных объектов сети, которые при изолированном моделировании теряют свою значимость для топологий большего масштаба.

Таким образом, модели транспортного потока на основе ТКА, имеющие в себе изначально заложенные возможности для осуществления параллельных вы-

числений, могут быть успешно дополнены распределением вычислений на больших топологиях, используя кластеры вычислительных узлов.

В результате при наличии предложенных в диссертации моделей и подходов в совокупности с другими научными разработками на данный момент имеется полный и довольно хорошо описанный базис, который позволяет реализовать и провести калибровку всех элементов необходимых для моделирования топологий любой сложности.

2.9 Выводы по Главе 2

1. На основе анализа материалов главы 1, в том числе обзора подходов к управлению движением транспорта в городах и систем управления городскими транспортными потоками, а также используемых для достижения этой цели существующих математических моделей транспортных потоков, сформулирована постановка задачи и обоснован актуальный подход к управлению и организации движения транспортных потоков в городских условиях на основании гибких инструментов моделирования. Рассматриваемые инструменты также определяются как базис для эффективного развития УДС городов.
2. Обоснована актуальность использования семейства моделей транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов для средних и крупных городов в качестве недорогих и гибких инструментов с понятными и легко-модифицируемыми правилами функционирования, а также изначально заложенными возможностями для осуществления параллельных вычислений.
3. Анализ фундаментальных и актуальных моделей транспортного потока на основе теории клеточного автомата позволил выявить направления дальнейших исследований моделей рассматриваемой группы и дополнить их новыми разработками для модели передвижения и модели мотиваций смены полосы движения.

4. Анализ существующих моделей рассматриваемой группы позволил выявить недостаточность формализации и общности их представления, поэтому было разработано четырехступенчатое унифицированное представление моделей транспортного потока на основе теории клеточных автоматов, а также сформулирован метод рефакторинга для приведения моделей к общему виду.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТА И РАЗВИТИЯ УДС ГОРОДОВ. РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

3.1 Оценка результатов работы моделей передвижения семейства клеточных автоматов

Для проведения моделирования и последующей оценки адекватности его результатов фундаментальным диаграммам использовались результаты исследований, представленные в работах [9, 48, 66].

В исследовании [9], которое во многом является отправной точкой для нововведений в модели транспортного потока на основе ТКА, предложенных в диссертации, используются пространственно-временные диаграммы и зависимость интенсивности движения автомобилей от плотности потока. В качестве рассматриваемых случаев для заданных параметров вероятностей модели выделены следующие три значения плотности транспортного потока: $0,25=46$ авт./км, $0,5=91$ авт./км, $0,75=137$ авт./км. Длиной рассматриваемой однополосной дороги выбрано значение $N = 800$ ячеек (длиной 4,4 км при $l_c = 5,5$ м).

В работе [48] с помощью моделирования транспортного потока на основе ТКА, а именно модели Нагеля-Шрекенберга 1992 года, исследуется феномен фантомных заторов (phantom traffic jam phenomenon), начиная с простого случая однополосной дороги и заканчивая моделированием двухполосной дороги с очередью на входе. В качестве длины дороги выбрано значение $N = 500$, при этом до первого шага работы автомата на основе заданных интенсивностей и плотностей движения дорога заполняется автомобилями, проводится 500 шагов моделирования и в качестве анализируемых состояний модели берутся последние 100 шагов. Помимо зависимостей и диаграмм, анализируемых в работе, описанной выше, также используется трехмерная пространственно-временная диаграмма, включающая в себя скорость в качестве третьего измерения.

В работе [66] проводится более фундаментальный анализ основных на 2004 год моделей и их характеристик, а также того, какие особенности потока они способны воспроизводить, а какие нет. Также важной целью работы является представление результатов работы моделей в свете эмпирических данных и особенностей процессов, протекающих в транспортном потоке при различных начальных условиях на микро- и макроуровнях. Данные, использованные при анализе, были собраны на магистрали с ограничениями скорости при помощи петлевых детекторов, которые позволяют получать информацию о количестве проезжающих машин, их скорости и загруженности дороги, из этих параметров могут быть посчитаны другие характеристики, как, например, пространственная дистанция (spatial distance) между ТС. В качестве данных для сравнения берутся одноминутные замеры.

Важно, что фундаментальные диаграммы зависимости потока от плотности, как это было показано в работе Кернера [65], должны рассматриваться для трех фаз состояния транспортного потока независимо, и, соответственно, эмпирические данные тоже должны собираться отдельно для каждой из фаз свободного потока (free flow), синхронизированного потока (synchronized traffic) и затора (wide jams).

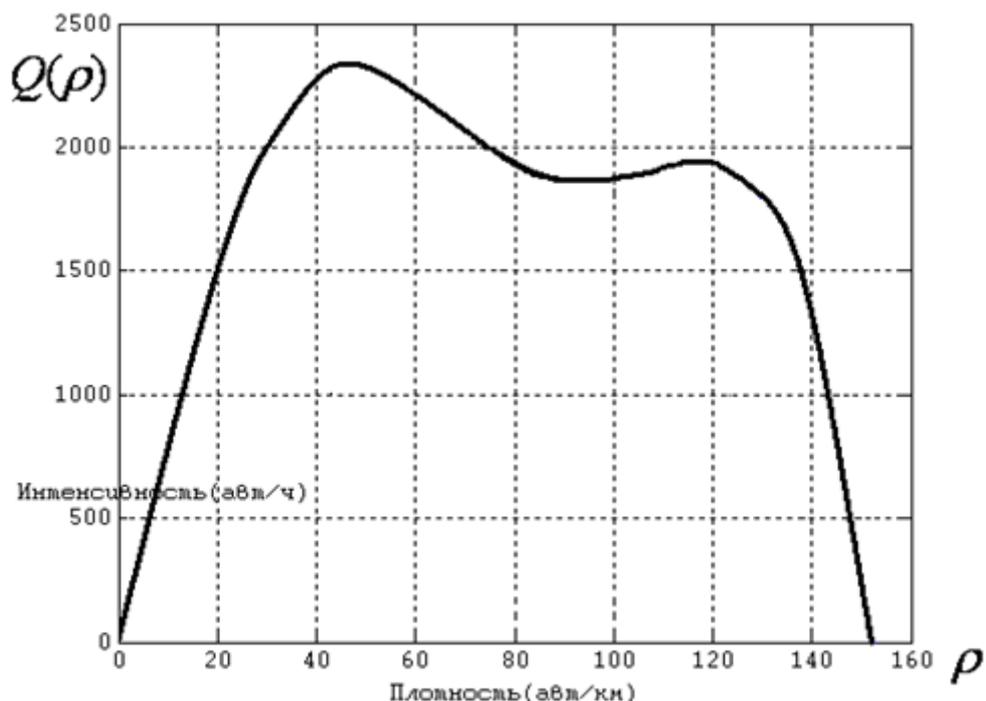


Рис. 3.1. Пример экспериментальной фундаментальной диаграммы

Рис. 3.1 представляет пример фундаментальной диаграммы зависимости плотности потока от интенсивности, полученной по данным одного дня в 2005 году «Центром исследования транспортной инфраструктуры» г. Москвы для четырёхполосного участка дороги третьего транспортного кольца от Автозаводской улицы до Варшавского шоссе.

Пространственная плотность $\rho(t)$ может быть рассчитана по формуле (1).

$$\rho(t) = \frac{J(t)}{v(t)} \quad (1)$$

$J(t)$ — количество ТС проезжающих через датчик со средней скоростью $v(t)$ за соответствующий период времени. На рис. 3.1 в качестве условного обозначения интенсивности используется $Q(\rho)$, это более характерно для русскоязычных исследований.

Также в этой работе рассматривается распределение временных интервалов между текущим ТС и предыдущим в секундах t_{hi} (time-headway).

Согласно работе [66] плотность, поток и скорость могут быть измерены глобально следующим образом: плотность ρ_{global} может быть посчитана напрямую исходя из количества ТС N_v на интересующем участке дороги длиной L по формуле (2).

$$\rho_{global} = \frac{N_v}{L} \quad (2)$$

Средняя скорость v_{global} рассчитывается по формуле (3), как сумма скоростей всех ТС делённая на их количество.

$$v_{global} = \frac{1}{N_v} \sum_{i=1}^{N_v} v_i \quad (3)$$

Гидродинамические соотношения дают возможность рассчитать поток по формуле (4).

$$J_{global} = \rho_{global} \cdot v_{global} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N_v} v_i \quad (4)$$

Особо отмечается, что многие модели из группы КА не могут воспроизвести фундаментальные диаграммы для заторного режима, потому что они используют обратную плотность (inverse density) для калибровки длины одной клетки автомата, для таких моделей заторы компактны и практически никакого внутреннего потока (internal flux) не наблюдается. Хотя способность достаточно достоверно воспроизводить заторы и пробки является большим плюсом, в случае если скорость оттока ТС из пробки и другие макроскопические характеристики заторного состояния воспроизводятся.

Исследования показывают, что скорость оттока ТС из затора на удивление постоянна и равна 15 км/ч [63]. Выходящий поток J_{out} из затора значительно меньше, чем максимальный поток J_{max} , поэтому новый затор не образуется в окрестностях выхода из пробки. Эмпирически установлено, что $J_{max}/J_{out} \approx 1,5$ [61].

Последний тест, проводящийся в работе, это получение соотношения скорости и дистанции для различных фаз транспортного потока. Также это отношение называется функцией оптимальной скорости (optimal-velocity function). Это соотношение детально характеризует микроскопическую структуру различных фаз транспортного потока.

$$t_{h_i} = \frac{g_{i-1}}{v_i} \quad (3)$$

Где g_{i-1} — расстояние до ТС едущего позади.

Таким образом, для проверки адекватности предлагаемой в диссертационной работе модификации модели передвижения с шагом адаптивного торможения необходимо использовать достаточно длинную дорогу и большое количество шагов моделирования, как в работе [66], для того, чтобы привести поток в стабильное состояние, не учитывающее краевые эффекты.

Важным моментом при проведении достоверного моделирования является выбор способа получения необходимой плотности транспортного потока на полосе. Здесь есть быть несколько вариантов:

- Условно кольцевое представление полосы, при использовании которого до начала моделирования случайным образом генерируются ТС, исходя из необходимой плотности. Также ни одно ТС не покидает полосы, а лишь достигая конца, вновь переходит в начало.
- Представление полосы с открытым выходом, при использовании которого ТС, достигшее конца полосы, покидает модель и никогда больше не возвращается.

Гомогенное состояние модели, получаемой на момент инициализации, когда все ТС размещаются сразу и не покидают модель, даёт возможность генерировать потоки большой плотности. Подход, при котором ТС генерируется на каждом шаге работы модели, в случае если необходимая плотность ещё не достигнута, не позволяет получать даже средние значения плотности транспортного потока.

3.2 Анализ соответствия разработанной однополосной однонаправленной модели передвижения фундаментальным диаграммам

Моделируемая однополосная дорога состоит из $N = 800$ ячеек, большее значение, позволившее бы избежать искажений связанных с конечностью длины дороги, не было выбрано, чтобы результаты можно было сравнивать с представленными в работе [9], также из неё взяты значения вероятностей $p = 0,2$; $p_{sts} = 0,68$; $p_{sa} = 0,8$; $p_s = 0,7$; и дистанций $d_{sts} = 1$; $d_{sa} = 10$; . Параметры для проведения моделирования были подобраны следующим образом $v_{max} = 60$ км/ч = Зклетки/ Δt , $\Delta t = 1$ сек, длина клетки 5,5 м. Приводимые далее диаграммы и зависимости отображают ситуацию на участке дороги длиной 300 ячеек в течение 100 последних итераций.

На рис. 3.2 представлены зависимости интенсивности движения от плотности потока для трёх ситуаций: когда полная остановка запрещена, разрешена и когда правило случайного замедления не работает.

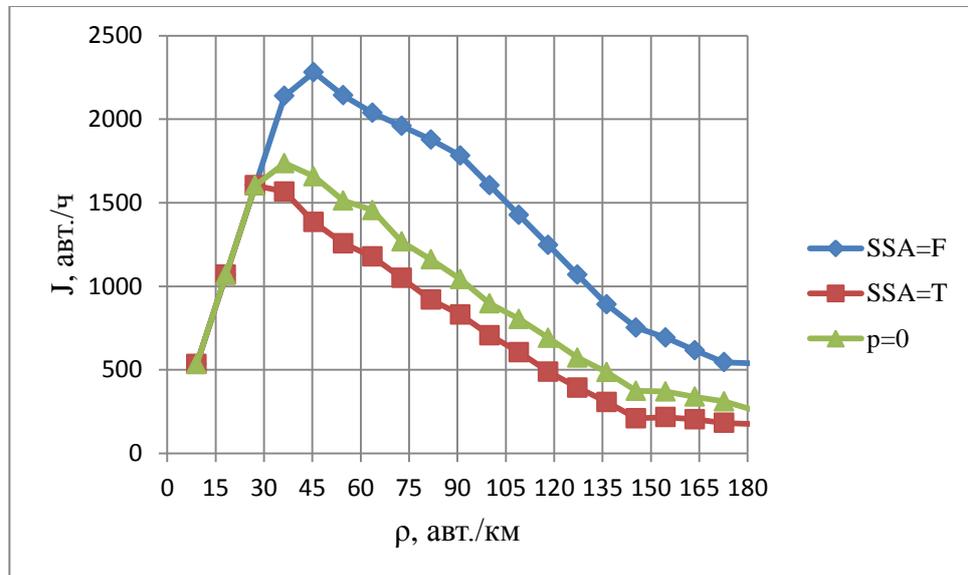


Рис. 3.2. Зависимость интенсивности движения от плотности потока

Рассмотрев данные зависимости, делаем вывод, что треугольная форма фундаментальной диаграммы выполняется, т.е. макроскопические свойства транспортного потока воспроизводятся, а также, что изменение даже нескольких параметров позволяет регулировать результирующую пропускную способность полосы при разных плотностях движения. Большинство значений потока могут быть получены при двух значениях плотности, естественно, что наиболее предпочтительным является режим с меньшей плотностью, которому, согласно зависимостям, представленным на рис. 3.3, соответствует большее значение средней скорости движения транспорта.

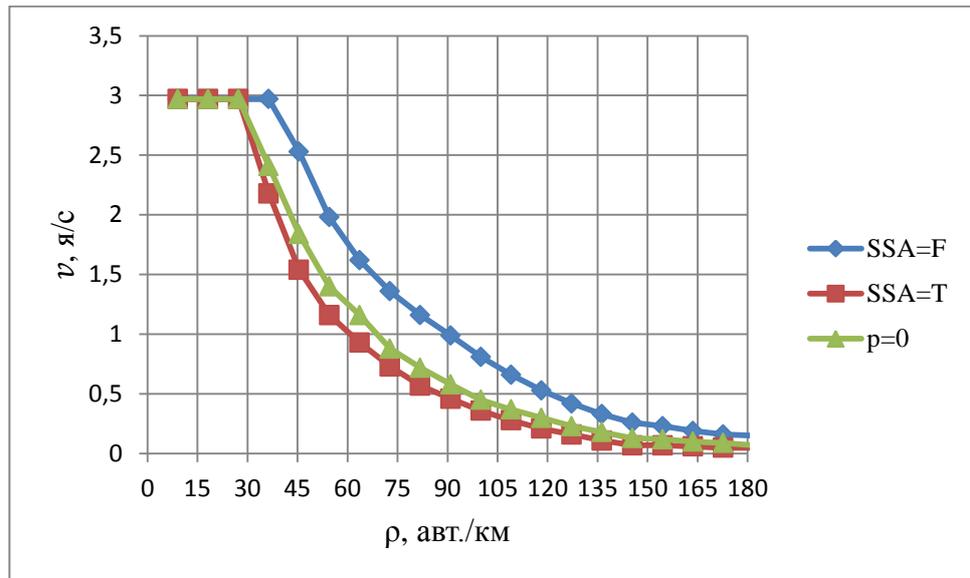


Рис. 3.3. Зависимость скорости движения от плотности потока

На рис. 3.4 и рис 3.5 представлены распределения временных интервалов между ТС соответственно для свободного и синхронизированного состояния транспортного потока. Рассматриваемое расстояние t_{hi} измеряется в секундах, ось ординат отражает частоту каждого конкретного значения расстояния t_{hi} . В режиме свободного потока наблюдается слабая корреляция с эмпирическими данными, использованными в работе [66], для синхронизированного режима напротив можно отметить схожую форму графиков.

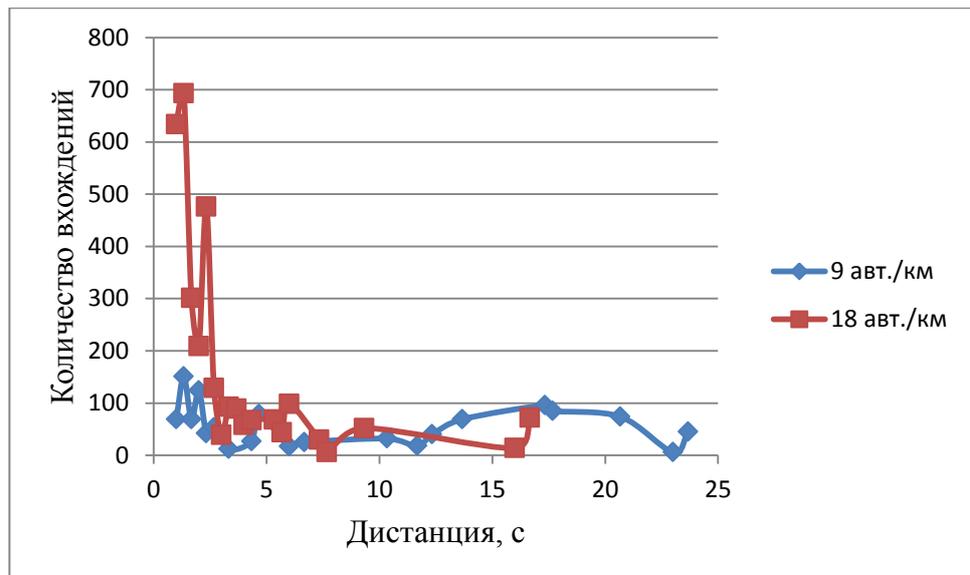


Рис. 3.4. Распределение временных интервалов между ТС для свободного потока

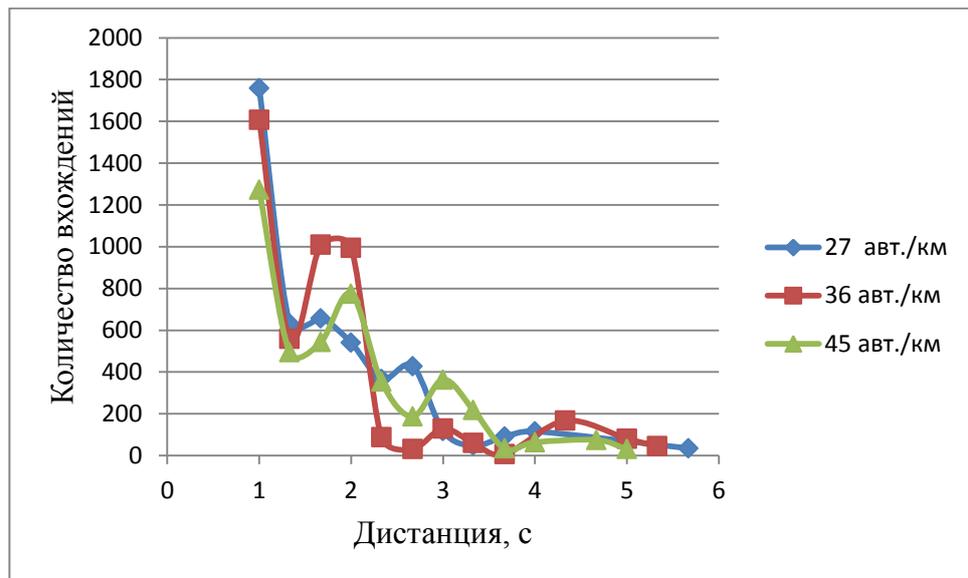


Рис. 3.5. Распределение временных интервалов между ТС для синхронизированного потока

На рис. 3.6 и рис 3.7 представлены пространственно-временные диаграммы для одного ТС. Пространственно-временные диаграммы отражают траектории движения ТС с помощью наклонных линий, горизонтальными линиями показываются не двигающиеся ТС. Угол наклона линии соответствующего ТС отражает его скорость, изгибы отражают изменение скорости, претерпеваемое ТС, например, торможение. В представленных диаграммах использованы данные только одного ТС, хотя зачастую показываются все ТС, находящиеся на рассматриваемом участке дороги. Выбор в пользу траектории только одного ТС был сделан в угоду простоте восприятия диаграммы при сохранении общего вида траектории всех ТС даже на примере одного единственного.

На рис. 3.6 при разрешённой полной остановке для плотностей движения 36 авт./км и 55 авт./км видна тенденция к образованию спонтанных локальных заторов, чего не наблюдается на рис. 3.7 при отсутствии возможности осуществить случайную полную остановку. При максимальной плотности движения, когда вся полоса занята ТС и нет свободных клеток, на обеих диаграммах видно, что ТС не движется на протяжении всего времени измерения.

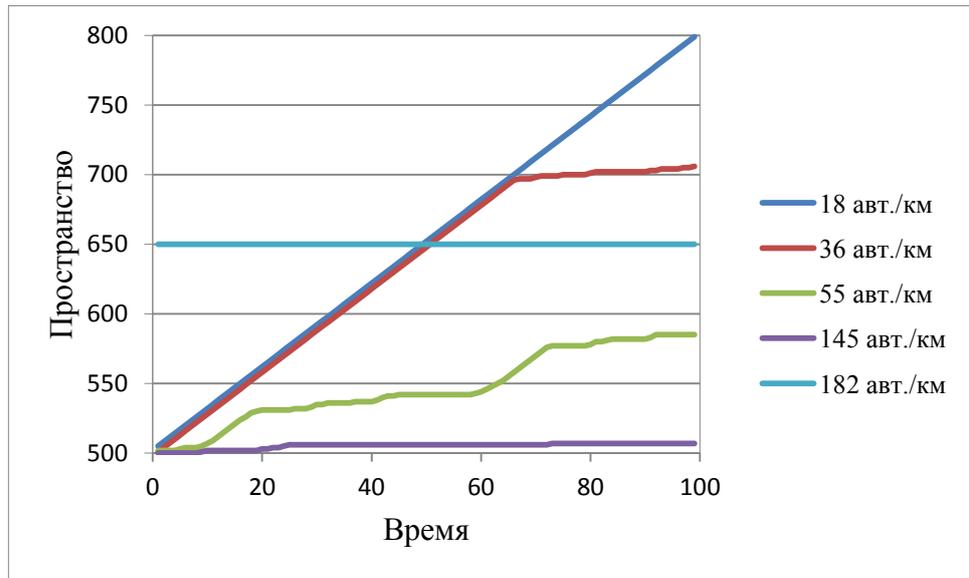


Рис. 3.6. Пространственно-временная диаграмма для одного ТС ($SSA = T$)

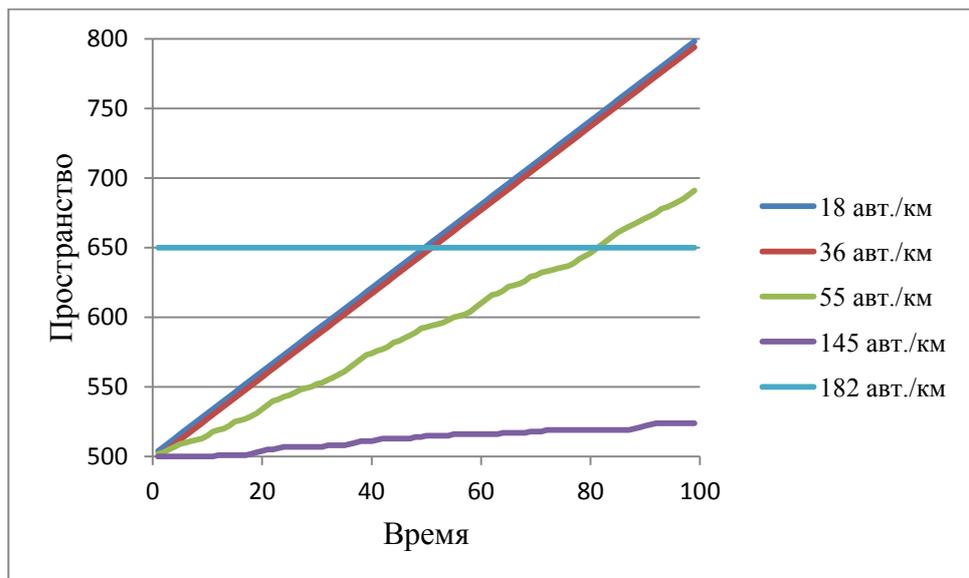


Рис. 3.7. Пространственно-временная диаграмма для одного ТС ($SSA = F$)

Результаты моделирования, представленные в параграфе, показывают осуществимость калибровки модели. Форма фундаментальных диаграмм позволяет судить о том, что макроскопические свойства транспортного потока воспроизводятся, для анализа микроскопических свойств модели необходимо провести дополнительные исследования, например, используя подход, методику и рассуждения, описанные в работе [66].

3.3 Методика создания системы управления движением транспорта и развития УДС городов

Подразделения министерства транспорта России, занимающиеся управлением и регулированием движения транспорта, а также планирующие дальнейшее развитие УДС городов, могут использовать в ходе своей работы разработанные в диссертации методы, модели, научные положения, программные средства, а также рекомендации по оценке адекватности принятия тех или иных решений по развитию УДС сложившейся дорожно-транспортной ситуации городов [26].

В случае сопоставимости сфер деятельности, интересов и ответственности, рассматриваемые подразделения имеют возможность осуществлять контролируемый и взвешенный выбор между различными проектами по управлению, модернизации и реконструкции УДС городов за счет использования математических моделей транспортного потока и метода многокритериальной оценки эффективности управленческих решений.

Для проведения обоснованного выбора проектных решений, направленных на улучшение дорожной ситуации, необходимо иметь возможность сравнивать их между собой по следующим критериям:

1. Срок окупаемости внедряемого решения. Очень важным аспектом является время, которое необходимо системе для того, чтобы экономически оправдать свое внедрение. Теоретически, для некоторых проектов окупаемость как таковая может быть не достижима.
2. Увеличение пропускной способности. Так или иначе, образование заторных ситуаций на дорогах и неудовлетворительное качество предоставляемых транспортных услуг, в основном, возникает, когда УДС уже не может соответствовать постоянно растущим потребностям общества. Таким образом, то, насколько повышается пропускная способность УДС вследствие внедрения рассматриваемого решения, позволяет судить о том, в какой мере потенциально может вырасти пассажиропоток без ощутимого ущерба для качества транспортного сообщения.

3. Увеличение скорости сообщения. Увеличивая пропускную способность системы, мы не всегда можем говорить об увеличении скорости сообщения, то есть сокращении фактического времени, которое необходимо автомобилисту, чтобы добраться из точки А в точку Б.
4. Влияние на работу массового пассажирского транспорта. Одним из наиболее сложных вопросов является степень влияния принимаемого решения на качество услуг, предоставляемых общественным транспортом.
5. Стоимость внедрения и поддержки. Как и срок окупаемости, этот критерий тесно связан с экономической целесообразностью реализации проекта в среднесрочной и долгосрочной перспективе.

Использование недорогих средств моделирования транспортных потоков, разработанных в диссертационной работе, позволяет добиваться принятия в достаточной степени эффективных решений при минимальных затратах. Это становится особенно актуально в условиях нового экономического кризиса, а также недофинансирования на его фоне подразделений министерства транспорта России. Таким образом, сейчас возрастает необходимость использования наиболее простых и гибких средств моделирования транспорта, вплоть до того момента, пока их возможности не станут близки к исчерпанию для городов с недостаточной степенью автоматизации регулирования дорожного движения. В то же самое время подобные модели позволяют осуществлять взвешенный выбор проектных альтернатив за счет двухступенчатой проверки экспертных оценок, которая представлена далее в этой главе.

Перед переходом к изложению основных методических положений по использованию рассматриваемых в диссертации методов и моделей, стоит отметить следующее. Основой принятия любого управленческого решения, в независимости от сферы его применения, является определенный набор этапов, предшествующих этому решению: подготовка и анализ имеющейся информации, обоснование подходов, адекватных решаемой задаче, технология выбора лучшего варианта и т.д. В рамках рассматриваемой предметной области управления дорожным дви-

жением и развития УДС городов, подготовка и принятие управленческих решений, в общем, включает в себя следующие основные этапы:

1. Выявление ключевых целей и задач, относящихся к сферам регулирования, управления и развития. В качестве общих стратегических задач на уровне страны необходимо руководствоваться Транспортной стратегией РФ на период до 2030 года [21]. Однако слепое следование целям и задачам, описанным в представленном документе, не может считаться целесообразным для большинства городов России, но грамотное видение стратегической задачи развития УДС городов эта стратегия способна дать для всех случаев.
2. Выявление приоритетов сформированных целей и задач на краткосрочную, среднесрочную и долгосрочную перспективу. От грамотной расстановки приоритетов зависит не только, на что пойдут средства бюджета в первую очередь, но и, возможно, то, насколько быстро качество предоставляемых транспортных услуг повысится до степени, когда это будет отмечено обществом.
3. Анализ сложившейся дорожной ситуации, выявление текущих проблем с помощью экспертного сообщества, проверка высказываемых предположений об их природе при помощи средств моделирования и визуализации. Моделирование, как таковое, сложно считать инструментом, позволяющим автоматически решать сложные задачи, которые стоят перед городами в сфере транспорта, однако в совокупности с мнением экспертного сообщества, этот тандем обеспечивает принятие грамотных и взвешенных решений, основывающихся не только на интуиции, но и результатах апробации предлагаемых проектов моделированием.
4. Подбор решений, направленных на устранение наиболее острых проблем и на развитие УДС города. Как было сказано ранее, приоритетом должно являться развитие УДС города в целом и, конечно же, решение наиболее критичных проблем городов, однако, возможно, целесообразно также соблюдать баланс между активными действиями в качестве реакции на

проблемы, и проактивными действиями, направленными на борьбу с будущими сложностями.

5. Моделирование применения каждого проектного варианта с привлечением экспертных оценок как до моделирования, то есть на этапе проектирования, так и после такового. Сравнение результатов моделирования экспертных оценок до и после калибровки проектов должно использоваться для дальнейшего совершенствования методики использования экспертных оценок при планировании мероприятий по изменению параметров УДС городов.
6. Выбор наиболее рациональных и уместных альтернатив на основе сформулированных целей, задач, а также степени соответствия критериям эффективности. Недостаточно лишь апробации экспертных оценок моделирования и доказательства адекватности этих проектов решению рассматриваемых задач, обязательно необходима проверка соответствия получаемых результатов заявленным критериям эффективности, которые в целом могут отличаться значительно.
7. Анализ возможных последствий принятия того или иного управленческого решения. У любого принимаемого к реализации проектного решения могут быть как очевидные, так и не очевидные побочные эффекты. К сожалению, средства моделирования редко дают возможность предвидеть неявные негативные последствия, в данном случае окажется полезен опыт экспертного сообщества.
8. Проведение второго этапа экспертной оценки. Второй этап экспертной оценки проекта предполагает коррекцию определенного рода на основании результатов моделирования работы предлагаемого решения, вплоть до полной его переработки или же вообще отказа от внедрения.
9. Разработка проекта внедрения выбранного решения на всех уровнях. Внедрение масштабных и не очень проектов, затрагивающих как инфраструктурные изменения УДС, так и лишь регулирующих существующую аппаратную составляющую (например, светофоры), требует проработки

управленческих воздействий на множестве уровней, начиная с самого высокого уровня и заканчивая самым нижним операционным уровнем.

10. Контроль над исполнением принятого решения. Принятия проекта к реализации подчас недостаточно, необходима политическая воля для того, чтобы все-таки реализовать начатый проект до конца.
11. Мониторинг эффекта от внедренного решения. Зачастую оценки экономической эффективности применения проектного решения не сходятся с результатами, получаемыми после внедрения. Для того чтобы осуществлять грамотную работу над ошибками, необходим мониторинг и анализ причин расхождения ожидаемого и реального результатов.

Поскольку в процессе принятия и реализации управленческих решений имеется обратная связь, которая позволяет выявить, что были допущены определенные ошибки на описанных этапах, необходимо строить реализацию и подготовку решений таким образом, чтобы внесение корректив было возможно на любом этапе внедрения, то есть обязательно наличие некоторой гибкости в используемых процессах.

Однако лицам, принимающим управленческие решения по развитию УДС, необходимо также задействовать и те методы, которые всегда под рукой. Именно на проверку решений, получаемых в результате использования этих методов, и направлена основная часть разработанных в диссертации математических моделей и рекомендаций, хотя, конечно же, не все решения целесообразно проверять моделированием. К подобным методам можно отнести:

1. Методы принятия решений, базирующиеся на интуиции и опыте экспертной группы.
2. Методы принятия логически обоснованных решений, при подготовке которых эксперты руководствуются «здравым смыслом». Возможно, подобный подход чаще встречается при отклонении заведомо бесперспективных идей.
3. Научно обоснованные и проверенные временем методы различных школ управления дорожным движением. Безусловно, выбор наиболее опти-

мальных решений, соответствующих перечисленным выше критериям, требует анализа большого массива информации не без обширного привлечения современных средств моделирования, вне зависимости от выбора базовой управленческой школы.

Таким образом, обоснованность выбора того или иного класса решений, направленных на управление дорожным движением и на развитие УДС, зависит от конкретной ситуации и прогнозных оценок по увеличению транспортных потоков в городах. Нельзя взять на вооружение самый мощный инструментарий, такой как АСУДД, и рассчитывать, что он сам собой решит все задачи, не создаст при этом еще больших проблем и будет экономически обоснован. Также не следует забывать, что внедрение решения любого рода приносит целый шлейф как положительных, так и отрицательных побочных эффектов, которые могут быть не видны на проектном этапе. И со всеми как прогнозируемыми, так и не прогнозируемыми результатами будет необходимо в дальнейшем работать в краткосрочной и в долгосрочной перспективе.

При формировании управленческих решений, а также на этапе выбора лучших вариантов к ним предъявляются следующие требования:

1. обоснованность решения;
2. оптимальность выбора;
3. правомочность решения;
4. краткость и в тоже время информационная полнота;
5. четкое определение сроков;
6. адресность всех видов активностей;
7. выполнение в срок.

Проанализировав требования, предъявляемые при подготовке и принятии решений по управлению и организации дорожного движения, становится ясным, что все рассмотренные этапы и шаги объединяет использование научных методов управления, системный анализ объектов управления УДС, необходимость использования математических моделей, адекватных решаемой задаче.

Следует отметить, что зачастую советы и рекомендации, которые применяются при организации движения городов, базируются на опыте исторических наблюдений и мнении экспертной группы о том, какие параметры организации движения перекрестков в какое время дня приемлемы, и это является достаточным условием для воплощения в жизнь предлагаемых параметров элементов УДС городов. Отчасти это обусловлено отсутствием научно обоснованных методов расчета параметров перекрестков, которым бы владели эксперты, а также отчасти отсутствием методов проверки того, что предлагаемая схема организации движения на заданном участке сети действительно близка к оптимальной по ряду критериев. Одной из причин отсутствия внедренных программных и программно-аппаратных инструментов моделирования, которые бы позволяли выполнять оценку адекватности предлагаемых проектов сложившейся дорожной ситуации и рассматриваемым критериям эффективности работы УДС, является банальное недофинансирование подразделений, которые занимаются управлением дорожным движением.

Даже города, обладающие средствами видеофиксации нарушений скоростного режима на большинстве перекрестков, зачастую могут не иметь возможность, используя видеопотоки со всех подконтрольных пересечений, проанализировать транспортные потоки и получить исходные данные для моделирования, такие как интенсивность движения, средняя скорость потока по полосам, состав потока и т.д.

Автомобилисты, в свою очередь, не имеют средств информирования о том, каким образом настроена УДС города. В данном случае не стоит говорить об отсутствии именно подробной информации об организации движения на всех участках дороги, что, безусловно, может являться конечной целью — полный доступ в том или ином виде к информации обо всех параметрах УДС, как статических, так и динамических. Важно то, что у водителей автомобилей нет возможности получить даже базовые рекомендации, какой скорости стоит придерживаться на заданном участке дороги, чтобы попасть в так называемую «зеленую волну». Зеленая волна, в свою очередь, рассчитывается под определенную скорость, не

зная которой водители делают максимально допустимые правилами дорожного движения ускорения и останавливаются на следующем светофоре, потому что связанные перекрестки не настроены на подобную среднюю скорость потока.

Таким образом, две ключевые проблемы для множества городов нашей страны сводятся к следующим пунктам:

1. Отсутствию информации о базовых параметрах транспортных потоков в каждый момент времени.
2. Отсутствию информации у водителей об организации движения на УДС.

Таким образом, оператор, обслуживающий АСУДД, которая позволяет менять организацию движения на перекрестках, не владеет достоверной информацией о параметрах транспортных потоков и, соответственно, даже гипотетически не способен на принятие объективных решений, вынужден полагаться только на удачу.

В максимально автоматизированном случае, где нет необходимости в операторе для принятия каких бы то ни было решений, система должна сама выбирать оптимальную схему организации движения, исходя из текущей загруженности сети и того, какие результаты показывает моделирование на ближайшие несколько часов.

А с другой стороны, водители не знают о УДС ничего, кроме ее топологии. То есть, не хватает способа информировать водителей, ведь если бы они обладали достоверными данными о пробках и рекомендуемой АСУДД скоростью на разных участках, то это позволило бы автоматически перераспределить нагрузку на сети, водители бы выбирали наименее загруженные участки и, придерживаясь желаемой скорости, сокращали время в пути.

С одной стороны, потери времени и простой в пробках ведет к перерасходу горючего, а с другой, чем больше автомобили потратят горючего, тем чаще им придется посещать автозаправочные станции и, соответственно, отчисления в бюджет города будут больше.

Потери же для жителей города посчитать намного сложнее. Такого рода исследования должны проводиться совместно социологами, транспортниками и

экономистами, и учитывать то, какие именно потери, помимо времени и морального вреда, несут участники дорожного движения, которые стоят в пробках, вынуждены выбирать не оптимальные маршруты, сталкиваются с низким качеством дорожного покрытия и т.д.

Исходя из этих ключевых проблем и возможностей, которые предоставляют средства моделирования транспорта, в общем виде системы подобного рода должны строиться следующим образом:

1. Блок получения информации о параметрах транспортных потоков. В идеале, необходимо иметь как интенсивность, так и среднюю скорость движения на потокопорождающих участках УДС, однако если есть возможность получить интенсивность, это уже дает возможность проводить приближенные к реальности циклы моделирования.
2. Блок, который способен, получая изменяющиеся данные о характеристиках транспортных потоков на УДС, моделировать ее работу на несколько часов вперед и, как минимум, выдавать график основных параметров сети. (Например, как меняется плотность движения со временем при заданной организации движения и параметрах потоков).
3. В интеллектуальной системе управления должен присутствовать блок, отвечающий за автоматическое принятие решения о необходимости смены схемы организации движения на участках сети.
4. Особое место при построении подобных систем должно занимать информирование водителей, начиная от рекомендуемой скорости на участках УДС и заканчивая мобильными приложениями, которые бы позволяли получать достоверную информацию о состоянии УДС в реальном времени.

Важно отметить, что предлагаемые составные части и общие требования, которые представлены выше, должны быть использованы в качестве основных целей работы над созданием системы управления дорожным движением. Эти блоки абсолютно естественны при построении АСУДД, однако не все они могут

быть реализованы в силу специфики отдельных городов, исторических особенностей их УДС, финансовой составляющей и т.д.

Внедрение АСУДД, как и других не бесплатных инструментов, зачастую просто очень дорого для большинства городов нашей страны. Даже если рассматривать покупку зарубежных программных продуктов, позволяющих интегрировать в них имеющиеся средства видеонаблюдения за дорожной ситуацией, то их исходный код закрыт, каждая дополнительная камера зачастую оплачивается отдельно и т.д. и т.п. В такой ситуации при внедрении подобных инструментов главным выгодополучателем становится вовсе не город, а компания, производящая данный продукт и осуществляющая его далеко не бесплатную поддержку.

Также трудно говорить о внедрении АСУДД, как о конечном процессе, который имеет строго ограниченные сроки ее внедрения. Дорожная ситуация в городе постоянно меняется, а значит должна происходить постоянная адаптация внедренной системы, ее совершенствование, возможно, переработка. В таком случае город оказывается в ловушке приобретенных и внедренных программных и программно-аппаратных продуктов. В данном случае можно говорить о крайней степени необходимости иметь свою собственную систему, разработка которой идет постепенно вместе с развитием и усложнением УДС города, организации движения на ней и систем информирования водителей о дорожной ситуации.

3.4 Применение разработанных научных положений, методов и моделей на практике

3.4.1 Моделирование участка УДС

Разработанные в ходе диссертационного исследования модели и алгоритмы были программно реализованы в виде библиотеки компонентов .NET Framework 4.5.2, которые позволяют осуществлять моделирование основных элементов УДС городов.

Для проверки адекватности результатов моделирования экспериментальным данным был выбран участок улицы Труда от её пересечения с улицей Энгельса и

до её пересечения с улицей Северо-Крымская. Выбор данного участка дороги обусловлен относительно небольшим количеством источников ТС, длинными перегонами, наличием камер, позволяющих определить начальные параметры моделей, такие как интенсивность, средняя скорость движения автомобилей. Также важным фактором является потенциал, который существует для данного участка УДС при переходе от светофорного регулирования с заданными циклами работы к выбору оптимального сочетания схем организации движения на связанных перекрестках для меняющихся в течение дня параметров транспортных потоков данного участка сети.

В качестве контрольного маршрута был выбран участок дороги длиной в 1650 м. Контрольными параметрами, которые оценивались экспериментально и с помощью моделирования, являлись средняя скорость движения ТС по маршруту, а также время сообщения по заданному маршруту. Время простоя в пробках не использовалось в качестве целевого показателя из-за субъективности оценки факта пребывания ТС в пробке перед перекрёстком и факта его выхода из зоны влияния перекрёстка.

Замеры времени сообщения и средней скорости проводились в часы пик, когда транспортные потоки находятся в синхронизированном состоянии (50 авт./км), а также в вечернее время, когда транспортные потоки находятся в свободном режиме (15 авт./км). Во время движения по маршруту соблюдались ПДД и скоростные ограничения на заданном участке дороги.

Контрольные заезды проводились в течение 5 рабочих дней по 2 днём и вечером, итого — 20 заездов.

Информация о длительности светофорных циклов для перекрёстков рассматриваемого участка сети и согласовании их работы была получена в АО «СМЭУ ГАИ». Пример исходных данных представлен в приложении 1.

В ходе сравнения результатов моделирования с результатами, полученными экспериментально, было выявлено, что для свободного режима транспортных потоков при низкой плотности движения значения средней скорости отклоняются от экспериментальных не более чем на 5%, а при высоких значениях плотности — не

более чем на 8%. Отклонение же по времени сообщения для свободного режима не превышало 19 секунд, а для синхронизированного режима 32 секунд.

Таким образом, результаты, получаемые с помощью моделирования, позволяют с достаточной степенью достоверности оценить основные параметры участка УДС при заданной топологии, организации и динамических параметрах транспортных потоков.

Фрагмент листинга программной реализации приведён в приложении 2.

3.4.2 Оценка проекта развития УДС

Разработанные модели, методика и подходы используются в городе Челябинске для участка улицы Труда. В качестве исходных данных для модели топологии выступают данные о схемах организации соответствующих перекрёстков и других интересующих участков дороги, примером подобных данных является приведённая в приложении 1 схема организации движения пересечения ул. Труда и ул. Энгельса.

Для точной оценки проекта развития УДС обязательным является реализация получения информации о транспортных потоках на заданном участке дороги с использованием камер на перекрестках. Необходимо получать данные об интенсивности движения, плотности, скорости каждого ТС, классификации каждого ТС (легковой, грузовой, общественный транспорт). Для решения данной задачи необходимо программно реализовать идеи, описанные во многих работах, касающихся определения характеристик транспортного потока по видео с камер, с использованием библиотеки OpenCV. В качестве работ по этому направлению можно выделить [2, 8, 16]. В них предлагаются разные методы, например, такие, как метод вычитания фона и метод Лукаса-Канаде. Решение задачи получения динамических параметров транспортных потоков заданного участка УДС позволяет проводить калибровку модели не только в течение одного дня или недели, а более длительно, а значит — точнее.

С учетом того, что сейчас в АСУДД, внедрённой в Челябинске, существует набор схем организации движения для рассматриваемых перекрёстков, то при ин-

теграции полученной модели топологии и подсистемы доступа «реального времени» к информации о характеристиках транспортного потока, появляется возможность моделировать все комбинации схем организации движения и осуществлять подбор наиболее оптимальных из них для оператора. Также возможно применять лучший вариант автоматически после проведения серии контролируемых испытаний, показывающих достаточную степень эффективности применения предлагаемой системы.

Проработав вопрос калибровки и апробации модели, необходимо переходить к определению того, способна ли предлагаемая модель и методика осуществлять поддержку принятия решений по развитию УДС города на среднюю и дальнюю перспективу.

Для решения этой задачи необходимо провести анализ проекта, предлагаемого профессором кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» ЮУрГУ Городокиным В.А. для рассматриваемого участка УДС города Челябинска. Во многом предлагаемый проект не только меняет архитектуру сети на заданном участке и организацию дорожного движения, но и вносит ряд существенных решений, направленных на повышение безопасности дорожного движения. На рис. 3.8 представлен общий вид для всего рассматриваемого участка УДС.



Рис. 3.8. Общий вид проекта развития УДС

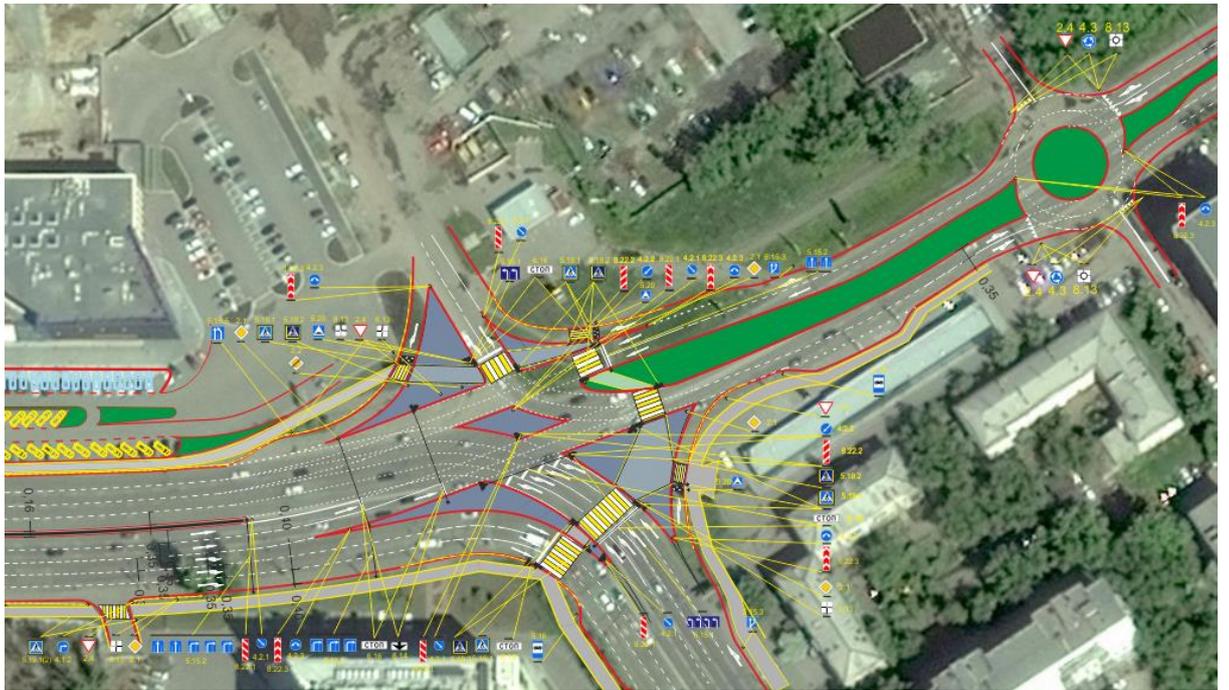


Рис. 3.9. Пересечение ул. Труда с улицами Энгельса и Клары Цеткин

На рис. 3.9 представлена часть проекта, касающаяся пересечения улицы Труда с улицами Энгельса и Клары Цеткин. Из наиболее интересных аспектов представленных решений отметим кольцо на пересечении с ул. Клары Цеткин, предлагается значительное разделение проезжих частей и переработанная схема организации пешеходных переходов на пересечении с ул. Энгельса.

На рис. 3.10 представлена часть проекта, касающаяся поворота с улицы Труда к зоопарку. Здесь также предлагается значительный пересмотр схемы организации движения пешеходов и создание явного разделения проезжих частей.

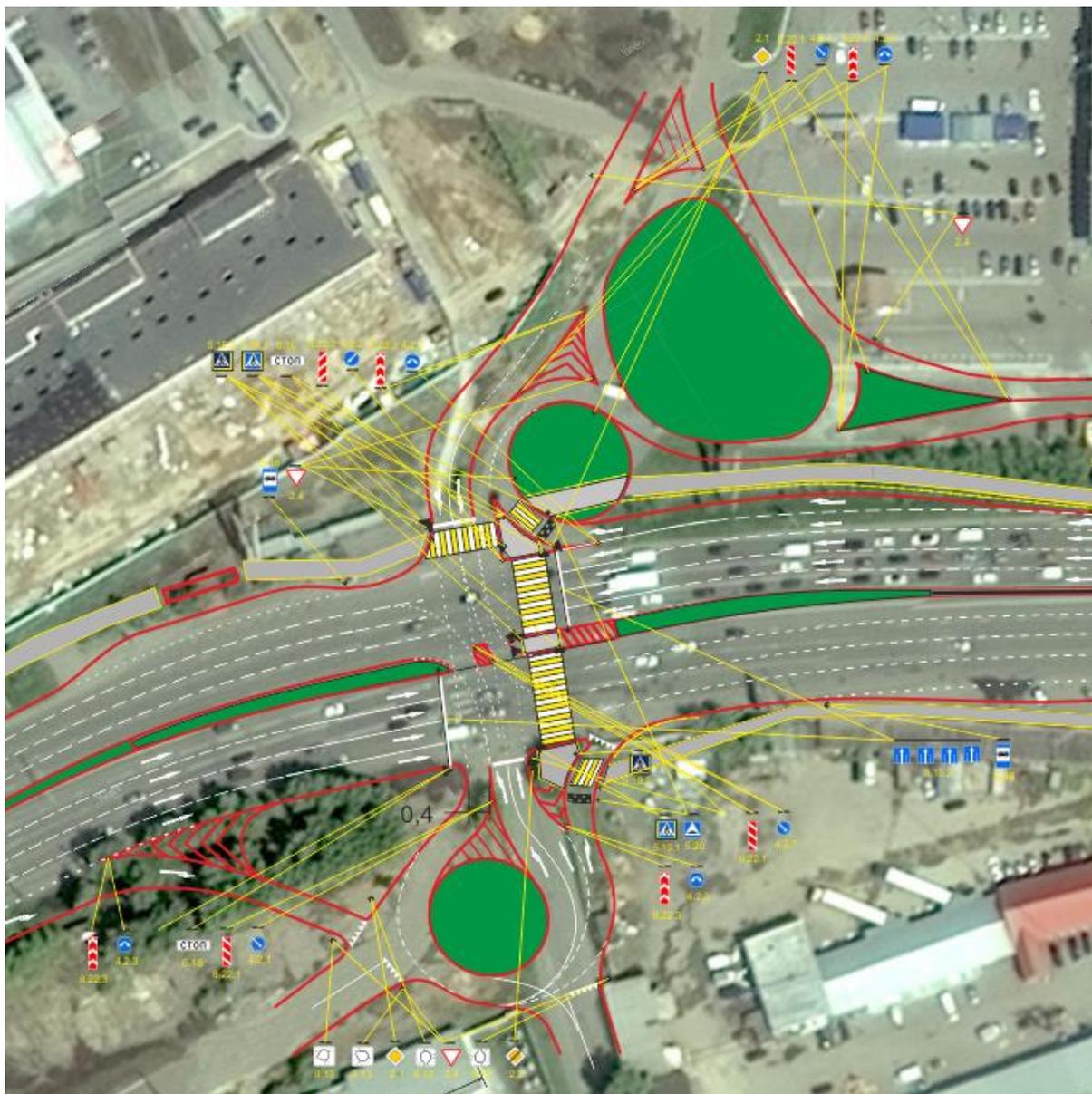


Рис. 3.10. Поворот с ул. Труда на зоопарк

На рис. 3.11 представлена часть проекта, касающаяся пересечения улицы Труда с улицей Северо-Крымская. Здесь, так же как и на описанных выше перекрестках, в большей степени переосмыслена организация движения пешеходов.



Рис. 3.11. Пересечение ул. Труда с ул. Северо-Крымская.

Для полноценной проверки предлагаемого проекта экспертной группе необходимо также определиться с наиболее подходящей на их взгляд организацией движения на рассматриваемых элементах УДС, затем с помощью моделирования можно будет сопоставить пропускную способность и время корреспонденции обоих вариантов схемы организации движения: текущего и предлагаемого.

По сравнению с простейшими светофорными объектами, описание модели которых не представляет особой сложности, для рассматриваемых перекрестков разработаны модели куда более сложных светофорных объектов.

В данном диссертационном исследовании не делается попытка дать оценку ни экономической эффективности, ни улучшению показателя пропускной способности рассматриваемого участка УДС города Челябинска посредством внедрения предлагаемого проекта. Но решать задачу оценки основных параметров проекта возможно и необходимо используя предлагаемый в диссертации комплекс методов и моделей.

3.5 Выводы по Главе 3

1. Представленные в главе 3 подходы к оценке реалистичности результатов моделирования однополосной дороги для моделей на основе ТКА показывают насколько разнообразны используемые виды зависимостей, однако основными все же являются зависимости интенсивности движения от плотности потока и пространственно-временные диаграммы.
2. Анализ соответствия результатов, получаемых с помощью модели передвижения с адаптивным шагом торможения, показывает, что в целом вид основных фундаментальных диаграмм достижим, то есть макроскопическое поведение воспроизводимо, а также, что возможна калибровка модели под конкретные эмпирические данные за счет подбора как её вероятностных, так и статических параметров.
3. Представленная в диссертации методика создания систем управления движением транспорта и развития УДС городов даёт возможность решать задачи оперативного регулирования дорожного движения во взаимосвязи с главной стратегической задачей развития УДС.
4. Представленный в работе пример апробации научных положений и моделей подтвердил возможность их использования на практике. Показана целесообразность использования разработанных методов, моделей, алгоритмов и подходов для оценки различных проектов развития УДС городов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Диссертационное исследование позволило решить важную научно-практическую задачу повышения эффективности и гибкости управления дорожным движением и развития УДС городов с помощью разработанной методики, математических моделей, алгоритмов и рекомендаций по практической реализации предлагаемых подходов и средств. Основные выводы и результаты диссертационного исследования состоят в следующем:

1. Выполненный в диссертации анализ различных подходов, методов и моделей, используемых для управления дорожным движением в крупных городах, показал, что они не обладают достаточной гибкостью и не позволяют обеспечивать упреждающее развитие улично-дорожной сети городов. Представлено обоснование того, что системы управления дорожным движением должны обеспечивать не только пропуск транспортных потоков через улично-дорожную сеть, но и давать возможность осуществлять её развитие в соответствии с динамикой транспортных потоков и неуклонно растущей нагрузкой на улично-дорожную сеть.
2. Разработаны алгоритмы и модели передвижения и смены полосы движения для группы моделей транспортного потока на основе теории клеточных автоматов семейства микромоделей, которые позволяют в достаточной степени воспроизводить поведение водителей и способны отображать основные характеристики транспортного потока.
3. Разработан общий язык представления моделей транспортного потока на основе теории клеточных автоматов за счет формирования четырехступенчатого унифицированного представления моделей транспортного потока рассматриваемой группы. Это дало возможность дополнительно снизить сложность создания и доработки данных моделей, которые изначально имеют более естественные правила функционирования, нежели модели других семейств.

4. Сформированы методические положения по созданию систем управления дорожным движением и развития улично-дорожной сети городов, базирующиеся на разработанных в диссертации методах, математических моделях и алгоритмах. Предложен подход использования инструментов моделирования для проведения упреждающего развития улично-дорожной сети городов.
5. Осуществлена апробация основных научных положений и разработок диссертационного исследования на практике в городе Челябинске (на участке улицы Труда от её пересечения с улицей Энгельса и до её пересечения с улицей Северо-Крымская). Внедрение разработок, полученных в ходе диссертационного исследования, позволяет повысить пропускную способность заданного участка улично-дорожной сети не менее чем на 15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автомобилизация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Автомобилизация> (дата обращения 05.06.2016).
2. Астратов, О.С. Обнаружение транспортных средств и оценка параметров транспортных потоков по видеопоследовательности / О.С. Астратов, С.А. Кузьмин // Информационно-управляющие системы. – 2006. – №3. – С. 19-28.
3. АСУД и светофоры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.fcr-pbdd.ru/special_equipment/20043/ (дата обращения 13.06.2014).
4. Бессветофорное движение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Бессветофорное_движение (дата обращения 05.06.2016).
5. Борьба с пробками в различных странах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://instanswer.ru/vneklassnaya-rabota/obuchenie/borba-s-probkami-v-razlichnykh-stranakh> (дата обращения 20.07.2014).
6. Высоцкая, А.А. Методы управления улично-дорожной сетью и оказание качественных государственных услуг / А.А. Высоцкая // Известия Иркутской государственной экономической академии. – 2008. – №5. – С. 75-78.
7. Гасников, А.В. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учеб. пособие / А.В. Гасников [и др.] – Под ред. А.В. Гасникова. – М.: МФТИ, 2010. – 362 с.
8. Джавадов, А.А. Разработка алгоритма метода получения параметров автотранспортного потока по регистрационным знакам автомобилей / А.А. Джавадов, Ю.С. Калашникова, С.А. Кривоспиченко, А.С. Снигур // Молодой ученый. – 2014. – №21. – С. 165-168.
9. Долгушин Д. Ю. Применение клеточных автоматов к моделированию автотранспортных потоков [Электронный ресурс] / Д. Ю. Долгушин, Т.А.

Мызникова – Омск, 2012 – Режим доступа: <http://bek.sibadi.org/fulltext/epd624.pdf> (дата обращения 01.02.2015).

10. Долгушин, Д.Ю. Двухуровневое моделирование автотранспортных потоков на основе клеточных автоматов и систем с очередями [Электронный ресурс] / Д.Ю. Долгушин, В.Н. Задорожный, С.В. Кокорин – 2012. – Режим доступа: <http://asud55.ru/archives/434> (дата обращения 01.02.2015).

11. Задорожный, В.Н. Моделирование автотранспортных сетей и потоков: программные средства и математические подходы [Электронный ресурс] / В.Н. Задорожный, Е.Б. Юдин. – Режим доступа: <http://asud55.ru/archives/434> (дата обращения 01.02.2015).

12. Логиновский, О.В. Анализ развития математического моделирования транспорта и перспективы использования клеточных автоматов в решении задач средних и крупных городов / О.В. Логиновский, А.А. Шинкарев // Динамика сложных систем — XXI век. – 2016. – №1. – С. 3-14.

13. Логиновский, О.В. Оптимальное развитие системы пересечений магистралей города / О.В. Логиновский / Известия высших учебных заведений. Архитектура и строительство. – 1978. – № 8. – С.62-68.

14. Логиновский, О.В. Развитие подходов к управлению и организации движения транспорта в крупных городах / О.В. Логиновский, А.А. Шинкарев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – том 14, №4. – С. 51-58.

15. Логиновский, О.В. Управление и стратегии / О.В. Логиновский. – Оренбург: Издательство ОГУ. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2001. – 704с.

16. Марьенков, Е.В. Автоматизированное определение параметров транспортных потоков / Е.В. Марьенков, А.В. Протодяконов, А.Н. Фомин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – №4. – С. 156-159.

17. Светофор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Светофор> (дата обращения 07.05.2016).

18. Семенов, В.В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса / В.В. Семенов. – Москва, 2004. – 44 с. – (Препринт / ИПМ им. М.В. Келдыша РАН; № 34).
19. Совершенствование организации дорожного движения в г. Москве // Газета ГУВД Москвы «Петровка 38». – М., 2009. – № 32.
20. Ставничий Ю.А. Транспортные системы городов. / Ю.А. Ставничий – М.: Стройиздат, 1990. – 220 с.
21. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rosavtodor.ru/storage/b/2014/06/24/trans_strat.pdf (дата обращения 25.08.2016).
22. Фаулер М. Рефакторинг: улучшение существующего кода / Пер. с англ. – СПб: Символ-Плюс, 2003. – 432 с.
23. Шинкарев, А.А. Анализ и рефакторинг представления моделей транспортных потоков на основе клеточного автомата / А.А. Шинкарев // В мире научных открытий. – 2015. – №4.1(64). – С. 585-595.
24. Шинкарев, А.А. Мотивации смены полосы движения и их классификация для моделей транспортных потоков на основе клеточных автоматов / А.А. Шинкарев // Управление в социальных и экономических системах: сборник научных трудов / под ред. О.В. Логиновского. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Вып. 3. – С. 110-112.
25. Шинкарев, А.А. Поддержка принятия решений по управлению УДС как сервис / А.А. Шинкарев // Управление в социальных и экономических системах: сборник научных трудов / под ред. О.В. Логиновского. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Вып. 3. – С. 113-116.
26. Шинкарев, А.А. Построение систем управления движением транспорта на базе инструментов моделирования транспортных потоков / А.А. Шинкарев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – часть 2, №9(51). – С. 107-109. DOI: 10.18454/irj.2016.51.050.

27. Шинкарев, А.А. Развитие улично-дорожной сети города и средства повышения эффективности ее работы / А.А. Шинкарев // Научный поиск: материалы восьмой научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 192-196.
28. Шинкарев, А.А. Трехступенчатое унифицированное представление моделей транспортных потоков на основе клеточного автомата / А.А. Шинкарев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. часть 1, №3(34). – С. 126-128.
29. Шинкарев, А.А. Управление движением транспорта в крупных городах / А.А. Шинкарев // Управление в социальных и экономических системах: сборник научных трудов / под ред. О.В. Логиновского. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Вып. 3. – С. 117-125.
30. Aw A. Resurrection of “second order models” of traffic flow / A. Aw, M. Rascle // SIAM Journal on Applied Mathematics. – 2000. – Vol. 60(3). – P. 916-938.
31. Bando M. Analysis of optimal velocity model with explicit delay / M. Bando, K. Hasebe, K. Nakanishi, A. Nakayama // Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics American Physical Society. – 1998. – Vol. 58(5). – P. 5429-5435.
32. Bando M. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation / M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, Y. Sugiyama // Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics American Physical Society. – 1995. – Vol. 51. – P. 1035-1042.
33. Banister D. The sustainable mobility paradigm / D. Banister // Transport Policy. – 2008. Vol. 15. – P. 73-80.
34. Bellomo N. On the modeling of traffic and crowds: a survey of models, speculations, and perspectives / N. Bellomo, C. Dogbe // Society for Industrial and Applied Mathematics. – 2011. – Vol. 53 – P. 409-463.

35. Benzoni-Gavage S. An n-populations model for traffic flow / S. Benzoni-Gavage, R.M. Colombo // *European Journal of Applied Mathematics*. – 2003. – Vol. 14(05). – P. 587-612.
36. Bexelius S. An extended model for car-following / S. Bexelius // *Transportation Research*. – 1968. – Vol. 2(1). – P. 13-21.
37. Bourrel E. Mixing microscopic and macroscopic representations of traffic flow hybrid model based on Lighthill-Whitham-Richards theory / E. Bourrel, J.B. Lesort // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2003. – Vol. 1852. – P. 193-200.
38. Brackstone M. Car-following: a historical review / M. Brackstone, M. McDonald // *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. – 1999. – Vol. 2(4). – P. 181-196.
39. Branston D. Models of single lane time headway distributions / D. Branston // *Transportation Science*. – 1976. – Vol. 10(2). – P. 125-148.
40. Buckley D.J. A semi-Poisson model of traffic flow / D.J. Buckley // *Transportation Science*. – 1968. – Vol. 2(2). – P. 107-133.
41. Carey M. Comparing whole-link travel-time models / M. Carey, Y.E. Ge // *Transportation Research Part B* – 2003. – Vol. 37. – P. 905-926.
42. Chandler R. Traffic dynamics: studies in car following / R. Chandler, R. Herman, E. Montroll // *Operations Research*. – 1958. – Vol. 6(2). – P. 165-184.
43. Chanut S. Macroscopic model and its numerical solution for two-flow mixed traffic with different speeds and lengths / S. Chanut, C. Buisson // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2003. – Vol. 1852. – P. 209-219.
44. Daganzo C.F. A behavioral theory of multi-lane traffic flow. Part I: long homogeneous freeway sections / C.F. Daganzo // *Transportation Research Part B Methodological*. – 2002. – Vol. 36(2). – P. 131-158.
45. Daganzo C.F. A simple physical principle for the simulation of freeways with special lanes and priority vehicles / C.F. Daganzo, W.H. Lin, J. del Castillo

- // *Transportation Research Part B Methodological*. – 1997. – Vol. 31(2) – P. 103-125.
46. Daganzo C.F. Requiem for second-order fluid approximations of traffic flow / C.F. Daganzo // *Transportation Research Part B Methodological*. – 1995. – Vol. 29(4). – P. 277-286.
47. Daganzo C.F. The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory / C. F. Daganzo // *Transportation Research Part B*. – 1994. – Vol. 28(4). – P. 269-287.
48. Ding D. Modeling and simulation of highway traffic using a cellular automaton approach [Электронный ресурс] / D. Ding – 2011. – Режим доступа: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:483914/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения 04.02.2016).
49. Gazis D.C. Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow / D.C. Gazis, R. Herman, R.W. Rothery // *Operations Research*. – 1961. – Vol. 9(4). – P. 545-567.
50. Gipps P.G. A behavioral car-following model for computer simulation / P.G. Gipps // *Transportation Research Part B Methodological*. – 1981. – Vol. 15(2). – P. 105-111.
51. Hallmark S.L. Assessing impacts of improved signal timing and transportation control measure using an activity-specific modeling approach / S.L. Hallmark, I. Fomunung, R. Guensler, W. Bachman // *Transportation Research Record*. – 2000. – Vol. 1738. – P. 49-55.
52. Helly W. Simulation of bottlenecks in single lane traffic flow / W. Helly // *Theory of Traffic Flow Symposium, Proceedings*, Amsterdam: Elsevier Publishing Co. – 1961. – P. 207-238.
53. Herman R. Traffic dynamics: analysis of stability in car following / R. Herman, E.W. Montroll, R.B. Potts, R.W. Rothery // *Operations Research*. – 1959. – Vol. 7(1). – P. 86-106.

54. Hoogendoorn S.P. Dynamic first-order modeling of phase-transition probabilities / S.P. Hoogendoorn, H. van Lint, V.L. Knoop – Traffic and Granul Flow '07, Springer, Berlin. – 2009. – P. 85-92.
55. Hoogendoorn S.P. Generic gas-kinetic traffic systems modeling with applications to vehicular traffic flow / S.P. Hoogendoorn, P.H.L. Bovy // Transportation Research Part B Methodological. – 2001. – Vol. 35(4). – P. 317-336.
56. Hunt P.B. The SCOOT on-line traffic signal optimization technique / P.B. Hunt, D.L. Robertson, R.D. Bretherton // Traffic Engineering and Control. – 1982. – Vol. 23. – P. 190-192.
57. Jabari S.E. A stochastic model of traffic flow: Gaussian approximation and estimation / S.E. Jabari, H.X. Liu // Transportation Research Part B Methodological. – 2013. – Vol. 47. – P. 15-41.
58. Jabari S.E. A stochastic model of traffic flow: theoretical foundations / S.E. Jabari, H.X. Liu // Transportation Research Part B Methodological. – 2012. – Vol. 46(1). – P. 156-174.
59. Jin W.L. A kinematic wave theory of lane-changing traffic flow / W.L. Jin // Transportation Research Part B Methodological. – 2010. – Vol. 44. – P. 1001-1021.
60. Kerner B.S. Cellular automata approach to threephase theory [Электронный ресурс] / B.S. Kerner, S.L. Klenov, D. E. Wolf // Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0206370v4> (дата обращения 01.02.2015).
61. Kerner B.S. Experimental features and characteristics of traffic jams / B.S. Kerner, H. Rehborn // Physical Review E. – 1996. – Vol. 53(2). – P. 1297-1300.
62. Kerner B.S. Experimental features and characteristics of traffic jams / B.S. Kerner, H. Rehborn // Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics American Physical Society. – 1996. – Vol. 53. – P. 1297-1300.
63. Kerner B.S. Experimental Features of Self-Organization in Traffic Flow / B.S. Kerner // Physical Review Letters – 1998. – Vol. 81(17). – P. 3797-3800.

64. Kerner B.S. Introduction to modern traffic flow theory and control: the long road to three-phase traffic theory / B.S. Kerner – Springer, New York, 2009. – P. 278.
65. Kerner B.S. The physics of traffic / B.S. Kerner // *Physics World*. – 1999. – Vol. 12. – P. 25-30.
66. Knospe W. Empirical test for cellular automaton models of traffic flow / W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, M. Schreckenberg // *Physical Review*. – 2004. – Vol. 70.
67. Knospe W. Towards a Realistic Microscopic Description of Highway Traffic / W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, M. Schreckenberg // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. – Vol. 33. – 2000. – P. 477-485.
68. Kometani E. Dynamic behavior of traffic with a nonlinear spacing: speed relationship / E. Kometani, T. Sasaki // Amsterdam: Elsevier Publishing Co. – 1961. – Vol. 105. – P. 105-119.
69. Krug J. Universality classes for deterministic surface growth / J. Krug, H. Spohn // *Physical Review A*. – 1988. – Vol. 38. P. 4271-4283.
70. Laval J. A. Lane-changing in traffic streams / J.A. Laval, C.F. Daganzo // *Transportation Research Part B Methodological*. – 2006. – Vol. 40(3). – P. 251-264.
71. Laval J.A. A mechanism to describe the formation and propagation of stop-and-go waves in congested freeway traffic / J.A. Laval, L. Leclercq // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2010. – Vol. 368. – P. 4519-4541.
72. Lebacque J.P. A two phase extension of the LWR model based on the boundedness of traffic acceleration / J.P. Lebacque // *Transportation and traffic theory in the 21st century: proceedings of the 15th international symposium on transportation and traffic theory, Adelaide, Australia*. – 2002. – P. 697-718.
73. Lebacque J.P. Generic second order traffic flow modeling / J.P. Lebacque, S. Mammar – *Transportation and traffic theory*, Elsevier, Oxford. – 2007. – P. 755-776.

74. Leclercq L. A new numerical scheme for bounding acceleration in the LWR model / L. Leclercq // *Mathematics in transport, selected: proceedings of the 4th IMA international conference on mathematics in transport*, Elsevier, Amsterdam. – 2007. – P. 279-292.
75. Leclercq L. Hybrid approaches to the solutions of the “Lighthill-Whitham-Richards” models / L. Leclercq // *Transportation Research Part B Methodological*. – 2007. – Vol. 41(7). – P. 701-709.
76. Lenz H. Multi-anticipative car-following model / H. Lenz, C.K.Wagner, R. Sollacher // *European Physical Journal B Condensed Matter and Complex Systems*. – 1999. – Vol. 7. – P. 331-335.
77. Li X. Signal timing of intersections using integrated optimization of traffic quality, emissions and fuel consumption: a note / X. Li, G. Li, S. Pang, X. Yang, J. Tian // *Transportation Research Part D*. – 2004. – Vol. 9. – P. 401-407.
78. Lighthill M.J. On kinematic waves II: a theory of traffic flow on long crowded roads / M.J. Lighthill, G.B. Whitham // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*. – 1955. – Vol. 229(1178). – P. 317-345.
79. Mahnke R. Probabilistic description of traffic breakdown / R. Mahnke, R. Kuhne – *Traffic and granular flow’05*. – Springer, New York. – 2007. – P. 527-536.
80. Nagel K. A cellular automaton model for freeway traffic / K. Nagel, M. Schreckenberg // *Journal de Physique I France*. – 1992. – Vol. 2. P. 2221-2229.
81. Nair R. A porous flow model for disordered heterogeneous traffic streams [DVD] / R. Nair, H.S. Mahmassani, E. Miller-Hooks // *Transportation research board 89th annual meeting compendium of papers*, Washington D.C., 2012.
82. Newell G.F. Nonlinear effects in the dynamics of car following / G.F. Newell // *Operations Research*. – 1961. – Vol. 9(2). – P. 209-229.
83. Ngoduy D. Multiclass first-order modelling of traffic networks using discontinuous flow-density relationships / D. Ngoduy // *Transportmetrica*. – 2010. – Vol. 6(2). – P. 121-141.

84. Ngoduy D. Multiclass first-order simulation model to explain non-linear traffic phenomena / D. Ngoduy, R. Liu // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2007. – Vol. 385(2). – P. 667-682.
85. Ngoduy D. Multiclass first-order traffic model using stochastic fundamental diagrams / D. Ngoduy // *Transportmetrica*. – 2011. – Vol. 7(2). – P. 111-125.
86. Ossen S. Multi-anticipation and heterogeneity in car-following empirics and a first exploration of their implications / S. Ossen, S.P. Hoogendoorn – *Intelligent Transportation Systems Conference, 2006. ITSC'06. IEEE*. – P. 1615-1620.
87. Pandian S. Evaluating effects of traffic and vehicle characteristics on vehicular emissions near traffic intersections / S. Pandian, S. Gokhale, A.K. Ghoshal // *Transportation Research Part D*. – 2009. – Vol. 14. – P. 180-196.
88. Payne H.J. Models of freeway traffic and control / H.J. Payne – *Mathematical models of public systems. Simulation council proceedings*. – 1971. – P. 51-61.
89. Pipes L.A. An operational analysis of traffic dynamics / L.A. Pipes // *Journal Of Applied Physics*. – 1953 – Vol. 24(3). – P. 274-281.
90. Prigogine I. A Boltzmann-like approach for traffic flow / I. Prigogine, F.C. Andrews // *Operations Research*. – 1960. – Vol. 8(6). – P. 789-797.
91. Prigogine I. A Boltzmann-like approach to the statistical theory of traffic flow / I. Prigogine – Herman R. (ed) *Theory of traffic flow, Proceedings, Amsterdam: Elsevier Publishing Co.* – 1961. – P. 158-164.
92. Richards P.I. Shock waves on the highway / P.I. Richards // *Operations Research*. – 1956. – Vol. 4(1). – P. 42-51.
93. Shinkarev A.A. Prospects of Cellular Automata Usage for Middle and Large Cities Traffic Modeling / A.A. Shinkarev // *Proceedings of the Workshop on Technologies of Digital Signal Processing and Storing*. – 2015. – том 1, С. 104-107.
94. Shinkarev A.A. Refactoring as Complexity Decreasing Instrument of Representation of Traffic Flow Models Based on Cellular Automata / A.A. Shinkarev

// 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia. – 2016. P. 1-5.

95. Shinkarev A.A. Traffic Flow Model Based on Cellular Automata with Adaptive Deceleration / A.A. Shinkarev // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2016. – том 16, №1. – С. 160-164. DOI: 10.14529/ctcr160115.

96. Shinkarev A.A. Traffic Lane Changing Motivations for Traffic Flow Mathematical Models Based on Cellular Automata Theory / A.A. Shinkarev // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – №3(61). – С. 48-51.

97. Stanley J. Social Exclusion and the Value of Mobility / D.A. Hensher, J. Stanley, G. Currie, W.H. Greene, D. Vella-Brodrick // Journal of Transport Economics and Policy. – 2011. – Vol. 45(2). – P. 197-222.

98. Takayasu M. $1/f$ noise in a traffic model / M. Takayasu, H. Takayasu // Fractals. – 1993. – Vol. 1(4). P. 860-866.

99. Tampere C.M.J. Gas-kinetic traffic flow modeling including continuous driver behavior models / C.M.J. Tampere, B. van Arem, S.P. Hoogendoorn // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2003. – Vol. 1852 – P. 231-238.

100. Treiber M. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations / M. Treiber, A. Hennecke, D. Helbing // Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics American Physical Society. – 2000. – Vol. 62(2). – P. 1805-1824.

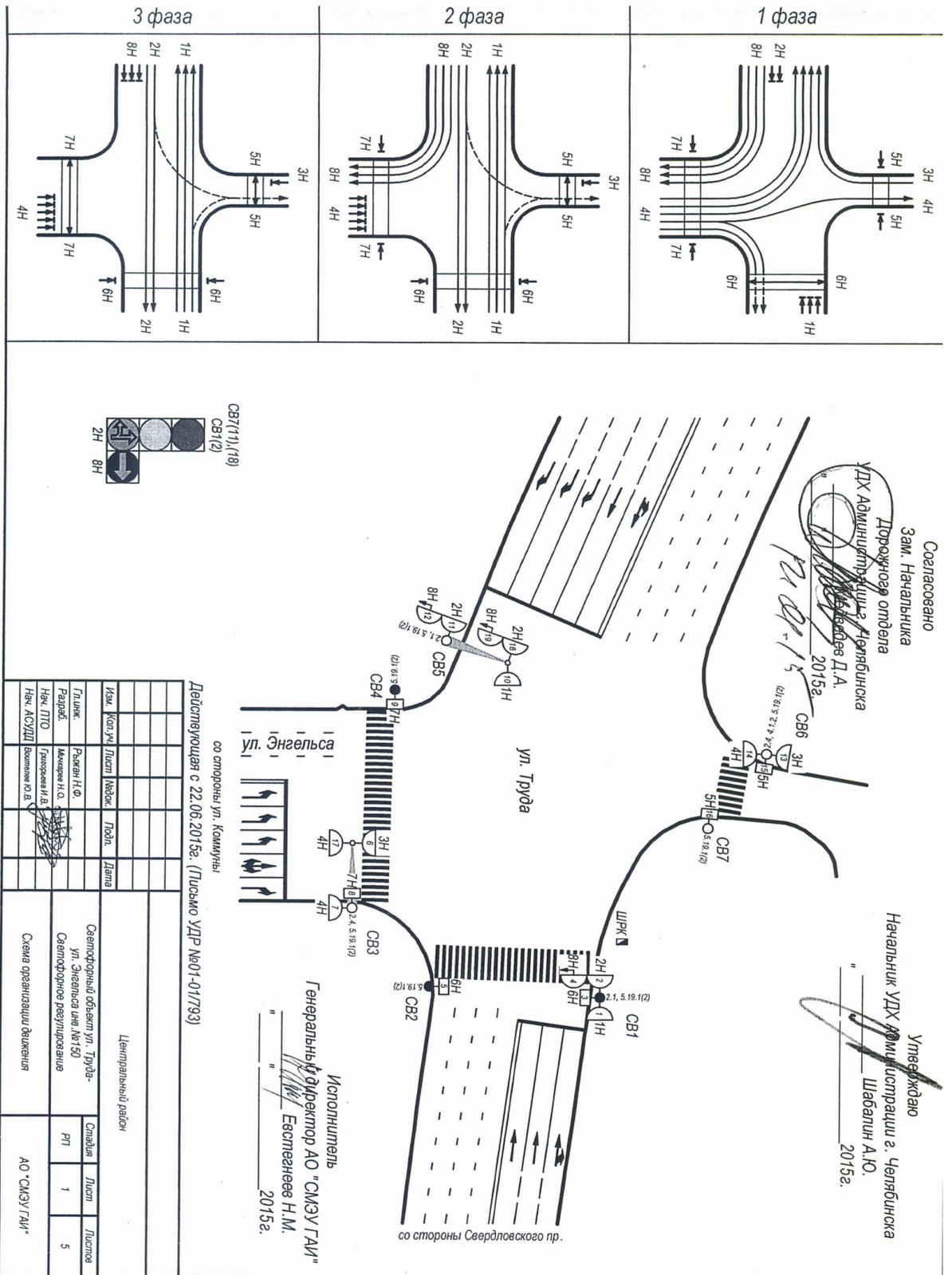
101. Treiber M. Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models / M. Treiber, A. Kesting, D. Helbing // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2006. – Vol. 360(1). – P. 71-88.

102. Treiber M. Macroscopic simulation of widely scattered synchronized traffic states / M. Treiber, D. Helbing // Journal of Physics A: Mathematical and General. – 1999. – Vol. 32(1).

103. Treiber M. Verkehrsdynamik und -simulationen: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik / M. Treiber, A. Kesting – Springer- Lehrbuch. – 2010. – P. 380.
104. Treiterer J. The hysteresis phenomenon in traffic flow / J. Treiterer, J.A. Myers, // In D.J. Buckley, editor, Proc. 6th ISTT, Artarmon, New South Wales. – 1974. – P. 13.
105. Unal A. Effect of arterial signalization and level of service on measured vehicle emissions / A. Unal, N.M. Roupail, H.C. Frey // Transportation Research Record. – 2003. – Vol. 1842. – P. 47-56.
106. van Lint J.W.C. Fastlane: a new multi-class first order traffic flow model / J.W.C van Lint, S.P. Hoogendoorn, M. Schreuder // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2008. – Vol. 2088. – P. 177-187.
107. van Wageningen-Kessels F. Genealogy of traffic flow models / F. Van Wageningen-Kessels, H. Fvan Lint, K. Vuik, S. Hoogendoorn // Springer Berlin Heidelberg. – 2015. – Vol. 4. – P. 445-473.
108. van Wageningen-Kessels F. Generic multi-class kinematic wave traffic flow modelling: Model development and analysis of its properties / F. van Wageningen-Kessels, J. van Lint, C. Vuik, S.P. Hoogendoorn // Transportation Research Board 92th annual meeting, under review for transportation research records, 2014.
109. Wagner P. Realistic Multi-Lane Traffic Rules for Cellular Automata / P. Wagner, K. Nagel, D.E. Wolf // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications – 1996. – Vol. 234. – P. 687-698.
110. Wiedemann R. Simulation des Strassenverkehrsflusses / R. Wiedemann – Institute for Traffic Engineering, University of Karlsruhe, Tech. Rep., 1974.
111. Wilson R.E. Car-following models: fifty years of linear stability analysis: a mathematical perspective / R.E. Wilson, J.A. Ward // Transp Plan Technol. – 2011. – Vol. 34(1). – P. 3-18.

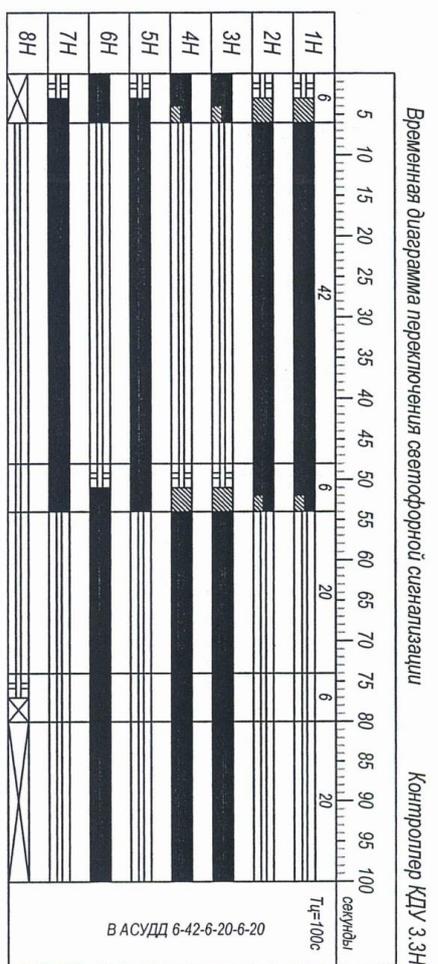
112. Wilson R.E. Mechanisms for spatio-temporal pattern formation in highway traffic models / R.E. Wilson // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2008. – Vol. 366(1872). – P. 2017-2032.
113. Wong G.C.K. A multi-class traffic flow model: an extension of LWR model with heterogeneous drivers / G.C.K. Wong, S.C. Wong // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2002. – Vol. 36(9). – P. 827-841.
114. Yang H. Traffic assignment and signal control in saturated road networks / H. Yang, S. Yagar // *Transportation Research Part A: Policy and Practice* – 1995. – Vol. 29. – P. 125-139.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Схема организации движения пересечения ул. Труда и ул. Энгельса



Утверждено
 Начальник ГИБДД
 Осиповский К.В.
 2011г.
 Государственный
 инспектор ГИБДД
 УВД г. Челябинска
 ЧУЧЕВА
 2011г.

Согласовано
 Генеральный директор ОАО "СМЗУ ГАИ"
 Ефименков Н.М.
 2011г.



Режим "Программа" круглоуполночно.

Действующая с 23.09.2009г. (Приказ №272а/тп-09 от 23 сентября 2009г.)

Изм.		Коп.уч.	Лист	Мягко	Подп.	Дата	248Р/08.11-СР	Реконструкция ул. Труда от ул. Звельса до ул. Северо-Крымская		
Глижк	Рязан Н.Ф.									
Развод.	Булгачева Е.Ю.						Светофорный объект ул. Труда- ул. Звельса дл. №150	Сматери	Лист	Листов
Нач. ПТО	Григорьев И.В.						Светофорное регулирование	РТ	2	5
Нач. АСУДД	Возманин Ю.В.						Временная диаграмма переключения светофорной сигнализации	ОАО "СМЗУ ГАИ"		

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Листинг фрагмента программной реализации

```

namespace CaModellingLibrary
{
    using System;
    using System.Collections.Generic;

    /// <summary>
    /// Represents a static model parameters
    /// </summary>
    public class ModelParameters
    {
        /// <summary>
        /// Length of a cell (meters)
        /// </summary>
        public decimal CellLengthInMeter { get; set; }

        /// <summary>
        /// Duration of a time step (seconds)
        /// </summary>
        public decimal TimeStepInSec { get; set; }

        /// <summary>
        /// Maximum velocity that vehicles can reach according
        /// to their technical characteristics (cells per time step)
        /// </summary>
        public int VehicleMaxPossibleVelocityInCells { get; set; }

        /// <summary>
        /// Maximally allowed velocity
        /// that vehicles can reach (cells per time step)
        /// </summary>
        public int MaxVelocityInCells { get; set; }

        /// <summary>
        /// Upper limit of distance
        /// when the slow-to-start rule is still applicable
        /// </summary>
        public int D_sts_InCells { get; set; }

        /// <summary>
        /// Upper limit of distance
        /// when the spatial anticipation rule is still applicable
        /// </summary>
        public int D_sa_InCells { get; set; }

        /// <summary>
        /// Probability of the random deceleration rule application
        /// </summary>
        public double P_Probability { get; set; }

        /// <summary>
        /// Probability of the slow-to-start rule application
        /// </summary>
        public double P_sts_Probability { get; set; }

        /// <summary>
        /// Probability of the spatial anticipation rule application
        /// </summary>
        public double P_sa_Probability { get; set; }
    }
}

```

```

    /// <summary>
    /// Probability of the over speed rule application
    /// </summary>
    public double P_s_Probability { get; set; }

    /// <summary>
    /// Determines the possibility of full stop
    /// </summary>
    public bool SSA { get; set; }

    /// <summary>
    /// Upper limit of steps without collision number
    /// when deceleration is expedient
    /// </summary>
    public int Z_upper { get; set; }

    /// <summary>
    /// Determines deceleration aggressiveness
    /// </summary>
    public decimal K_agr { get; set; }
}

/// <summary>
/// Represents a vehicle
/// </summary>
public class Vehicle
{
    private int _velocityInCells;
    private bool _stopSignal;

    private int _newVelocityInCells;
    private bool _newStopSignal;

    private Cell _cell;

    public Vehicle(int velocityInCells)
    {
        _velocityInCells = velocityInCells;
        _newVelocityInCells = velocityInCells;
    }

    public Cell GetCell()
    {
        return _cell;
    }

    public void SetCell(Cell cell)
    {
        _cell = cell;
    }

    public bool GetStopSignal()
    {
        return _stopSignal;
    }

    public int GetVelocityInCells()
    {
        return _velocityInCells;
    }

    public void SetNewStopSignal(bool newStopSignal)
    {
        _newStopSignal = newStopSignal;
    }
}

```

```

public void SetNewVelocityInCells(int newVelocityInCells)
{
    _newVelocityInCells = newVelocityInCells;
}

public void ApplyNewChanges()
{
    _velocityInCells = _newVelocityInCells;
    _stopSignal = _newStopSignal;
}
}

/// <summary>
/// Represents a cell
/// </summary>
public class Cell
{
    private Vehicle _vehicle;

    /// <summary>
    /// Recommended velocity that vehicles should follow (cells per time step)
    /// </summary>
    public int RecommendedVelocityInCells { get; set; }

    /// <summary>
    /// Velocity that is maximally allowed
    /// by the rules of the road (cells per time step)
    /// </summary>
    public int RulesOfTheRoadMaxVelocityInCells { get; set; }

    public bool IsFree()
    {
        return _vehicle == null;
    }

    public void Free()
    {
        _vehicle = null;
    }

    public Vehicle GetVehicle()
    {
        return _vehicle;
    }

    public void SetVehicle(Vehicle vehicle)
    {
        _vehicle = vehicle;
    }
}

/// <summary>
/// Represents calculated probabilities for the step
/// </summary>
public class StepProbabilities
{
    public StepProbabilities(double p, double p_sts, double p_sa, double p_s)
    {
        P = p;
        P_sts = p_sts;
        P_sa = p_sa;
        P_s = p_s;
    }

    public double P { get; private set; }
}

```

```

        public double P_sts { get; private set; }

        public double P_sa { get; private set; }

        public double P_s { get; private set; }
    }

    /// <summary>
    /// Represents Lane and consists of Cells and Vehicles
    /// </summary>
    public class Lane
    {
        private readonly ModelParameters _modelParameters;
        private readonly Func<Vehicle, int> _distanceToNextRoadPartVehicle;

        public List<Cell> Cells;
        public List<Vehicle> Vehicles;

        public Lane(ModelParameters modelParameters,
                    Func<Vehicle, int> distanceToNextRoadPartVehicle)
        {
            _modelParameters = modelParameters;
            _distanceToNextRoadPartVehicle = distanceToNextRoadPartVehicle;
        }

        public int LengthInCells
        {
            get { return Cells.Count; }
        }

        public int CalculateNewVehicleCellIndex(Vehicle vehicle,
                                                StepProbabilities stepProbabilities)
        {
            var current_v_i = vehicle.GetVelocityInCells();
            var nextVehicleDistance = GetDistanceToTheNextVehicle(vehicle);

            var v_i = current_v_i;

            v_i = AccelerationStep(stepProbabilities.P_sts,
                                   current_v_i,
                                   nextVehicleDistance);

            v_i = DecelerationStep(vehicle,
                                   stepProbabilities.P_sa,
                                   nextVehicleDistance, v_i);

            v_i = RandomDecelerationStep(stepProbabilities.P,
                                          v_i);

            v_i = RecommAndRestrictedVelocityValidationStep(vehicle,
                                                            v_i);

            v_i = OverSpeedStep(vehicle,
                                stepProbabilities.P_s,
                                v_i,
                                current_v_i);

            v_i = MaximumVelocityValidationStep(v_i);

            v_i = NegativeVelocityValidationStep(v_i);

            v_i = StoppingValidationStep(v_i);

            v_i = CollisionWithTheNextVehicleValidationStep(v_i,

```

```

        nextVehicleDistance);

    vehicle.SetNewVelocityInCells(v_i);

    return Cells.IndexOf(vehicle.GetCell()) + v_i;
}

private int AccelerationStep(double p_sts,
    int current_v_i,
    int distanceToTheNextVehicle)
{
    if (p_sts < _modelParameters.P_sts_Probability &&
        current_v_i == 0 &&
        distanceToTheNextVehicle <= _modelParameters.D_sts_InCells)
        return 0;

    return current_v_i + 1;
}

private int DecelerationStep(Vehicle vehicle,
    double p_sa,
    int distanceToTheNextVehicle,
    int v_i)
{
    var current_v_i = vehicle.GetVelocityInCells();

    vehicle.SetNewStopSignal(false);

    var nextVehicle = GetNextVehicle(vehicle);

    var v_i_diff = vehicle.GetVelocityInCells() - (nextVehicle == null
        ? _modelParameters.MaxVelocityInCells + 1
        : nextVehicle.GetVelocityInCells());

    if (p_sa < _modelParameters.P_sa_Probability &&
        distanceToTheNextVehicle <= _modelParameters.D_sa_InCells &&
        (nextVehicle != null &&
        (nextVehicle.GetStopSignal() || v_i_diff > 0)))
    {
        var notRoundedZ_i = (decimal) distanceToTheNextVehicle /
            v_i_diff;
        var z_i = Math.Floor(notRoundedZ_i);

        if (z_i > 0 && z_i < _modelParameters.Z_upper)
        {
            var notRoundedSubtrahend = v_i_diff *
                _modelParameters.K_agr / z_i;
            v_i = current_v_i -
                (int) Math.Ceiling(notRoundedSubtrahend);
        }
    }

    vehicle.SetNewStopSignal(v_i < current_v_i);

    return v_i;
}

private int RandomDecelerationStep(double p,
    int v_i)
{
    if (p < _modelParameters.P_Probability)
        return v_i - 1;

    return v_i;
}

```

```

private int RecommAndRestrictedVelocityValidationStep(Vehicle vehicle,
    int v_i)
{
    return Math.Min(v_i,
        Math.Min(vehicle.GetCell().RulesOfTheRoadMaxVelocityInCells,
            vehicle.GetCell().RecommendedVelocityInCells));
}

private int OverSpeedStep(Vehicle vehicle,
    double p_s,
    int v_i,
    int current_v_i)
{
    var cell = vehicle.GetCell();

    if (p_s < _modelParameters.P_s_Probability &&
        current_v_i == cell.RulesOfTheRoadMaxVelocityInCells)
        return current_v_i + 1;

    return v_i;
}

private int MaximumVelocityValidationStep(int v_i)
{
    return Math.Min(v_i,
        Math.Min(_modelParameters.MaxVelocityInCells,
            _modelParameters.VehicleMaxPossibleVelocityInCells));
}

private int NegativeVelocityValidationStep(int v_i)
{
    if (v_i < 0)
        return 0;

    return v_i;
}

private int StoppingValidationStep(int v_i)
{
    if (v_i == 0 && _modelParameters.SSA == false)
        return 1;

    return v_i;
}

private static int CollisionWithTheNextVehicleValidationStep(int v_i,
    int distanceToTheNextVehicle)
{
    if (v_i > distanceToTheNextVehicle)
        return distanceToTheNextVehicle;

    return v_i;
}

private Vehicle GetNextVehicle(Vehicle vehicle)
{
    var vehicleIndex = Vehicles.IndexOf(vehicle);

    if (vehicleIndex == Vehicles.Count - 1)
        return null;

    return Vehicles[vehicleIndex + 1];
}

```

```
private int GetDistanceToTheNextVehicle(Vehicle currentVehicle)
{
    var currentVehicleIndex = Vehicles.IndexOf(currentVehicle);
    var currentVehicleCell = currentVehicle.GetCell();

    if (currentVehicleIndex == Vehicles.Count - 1)
        return _distanceToNextRoadPartVehicle(currentVehicle);

    var nextVehicleCellIndex = currentVehicleIndex + 1;
    var nextVehicle = Vehicles[nextVehicleCellIndex];
    var theNextVehicleCell = nextVehicle.GetCell();

    return Cells.IndexOf(theNextVehicleCell) -
        Cells.IndexOf(currentVehicleCell) - 1;
}
}
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Документы внедрения

ДОКУМЕНТЫ ВНЕДРЕНИЯ



ПЕРВЫЙ ЗАМЕСТИТЕЛЬ МИНИСТРА СТРОИТЕЛЬСТВА И ИНФРАСТРУКТУРЫ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ

ул. Елькина, д. 77, Челябинск, 454048
Тел./факс (351) 237-83-88. E-mail: main@minstroy74.ru
ОКПО 00097471, ОГРН 1047423521386, ИНН/КПП 7451208332/745101001

АКТ

рассмотрения результатов диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Шинкарева Александра Андреевича на тему

«Методы и модели управления движением транспорта в крупных городах и их использование для упреждающего развития улично-дорожной сети»
выполненной по специальности 05.13.10 «Управление в социальных и экономических системах»

Мной были рассмотрены научные разработки, методические положения, основные выводы и результаты диссертационного исследования инженера Шинкарева Александра Андреевича на тему «Методы и модели управления движением транспорта в крупных городах и их использование для упреждающего развития улично-дорожной сети» и сделаны следующие выводы:

1. Цель и задачи диссертационной работы А.А. Шинкарева вполне обоснованы и логически вытекают из представленных в главе 1 диссертации материалов анализа подходов к управлению движением транспорта в городах, систем управления городскими транспортными потоками, математических моделей транспортного потока различных семейств и того, каким образом существующий инструментарий используется при решении задач, таких как увеличение пропускной способности улично-дорожной сети и проведение эффективного развития транспортной инфраструктуры городов.

2. Разработанные А.А. Шинкаревым математические модели однонаправленной многополосной дороги и мотиваций смены полосы движения обладают научной новизной и представляют интерес для

организаций и служб, связанных с управлением движением транспорта в городах, а также организаций в том или ином виде участвующих в совершенствовании улично-дорожной сети городских районов и городов.

3. Предложенные в диссертации подходы к использованию средств моделирования транспорта, в том числе базирующихся на моделях транспортного потока на основе теории клеточных автоматов, можно признать полезными для целей повышения эффективности регулирования дорожного движения и успешного развития улично-дорожной сети городов.

4. Сформированные в диссертации А.А. Шинкарева методические положения по созданию систем управления движением транспорта и развития улично-дорожной сети городов, а также материалы по созданию программной реализации предложенных моделей могут использоваться как в средних, так и в крупных или же больших городах.

Акцентирую своё внимание, что разработанные А.А. Шинкаревым научные положения, математические модели, методические разработки и рекомендации, а также обоснования и выводы представляют значительную ценность для управленческой практики организаций и служб, связанных с управлением движением транспорта в городах, и иных организаций, чьей деятельностью является анализ городской ситуации на дороге и поиск путей разрешения существующих и будущих проблем недостаточной пропускной способности улично-дорожной сети.

Особо следует отметить, что предложенные материалы по программной реализации описанных в диссертации моделей являются вполне универсальными и могут быть использованы для дальнейших исследований и при практическом внедрении.



В.С.Передерий

городскими транспортными потоками, математических моделей транспортного потока различных семейств, а также методов решения таких задач как увеличение пропускной способности улично-дорожной сети городов и средств организации дорожного движения позволил комплексно рассмотреть проблему управления движением транспорта и эффективного развития улично-дорожной сети крупных городов. Это дало возможность оценить состояние существующих методов и моделей управления движением транспорта во взаимосвязи с развитием улично-дорожной сети. На основе вышеупомянутого анализа автор вполне корректно формулирует цели и задачи диссертационного исследования.

3. Разработанные в диссертации новые математические модели однонаправленной многополосной дороги и мотиваций смены полосы движения, а также универсальный язык представления моделей транспортного потока на основе теории клеточных автоматов соответствуют современному уровню разработок и практики их внедрения в рассматриваемой области моделирования городских транспортных потоков.

4. Разработанные в диссертации научные положения, методы и математические модели могут быть использованы как в практике управления дорожным движением, так и для целей разработки проектов и различного рода мероприятий по своевременному совершенствованию систем организации дорожного движения на пересечениях проезжей части и улично-дорожной сети в целом.

5. Представленные в диссертационной работе методические положения и рекомендации вполне могут быть использованы для повышения качества проектного управления и уменьшения вероятности принятия несостоятельных решений и их последующей реализации.

Комиссия рекомендует использовать научные положения и разработки диссертационного исследования А.А. Шинкарева для внедрения в практику проектного управления, а также регулирования и организации дорожного движения в профильных организациях больших и крупных городов.

Председатель комиссии



/В.В. Кокорюкин

Члены комиссии:



/К.В. Макаренко



/Ю.В. Игнатъев



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ГАО «СМЭУ ГАИ»,

/Н.М.Евстегнеев

сентября 2016 г.

АКТ

внедрения результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Шинкарева Александра Андреевича на тему «Методы и модели управления движением транспорта в крупных городах и их использование для упреждающего развития улично-дорожной сети», выполненной по специальности 05.13.10 «Управление в социальных и экономических системах»

Рассмотрение и использование положений и результатов диссертационного исследования инженера Шинкарева Александра Андреевича позволило сделать следующие выводы:

1. Выполненный в диссертации анализ подходов, методов и моделей управления движением транспорта в крупных городах, а также разработанные в диссертации методы, модели и алгоритмы подготовки принятия решений по регулированию дорожного движения и упреждающему развитию улично-дорожной сети представляют практическую ценность для организаций, занимающихся вопросами управления движением транспорта в городах.

2. Разработанная библиотека базовых элементов и моделей может быть принята к использованию. При необходимости архитектура библиотеки позволяет расширять её за счет создания новых модулей.

3. Внедрение разработанных в диссертации моделей и программ возможно для участка дороги ул. Труда от её пересечения с ул. Энгельса до пересечения с ул. Северо-Крымская города Челябинска при условии проведения дополнительных натурных измерений транспортных и пешеходных потоков, и исследования условий их возможного распределения в местах притяжения и концентрации.

4. Предложенная в работе методика по созданию систем управления дорожным движением принята как базовая последовательность действий для интеграции результатов диссертационного исследования в существующую АСУДД города Челябинска.

Использование разработанных в диссертации моделей, алгоритмов и программ управления транспортными потоками в городах даёт возможность рассчитывать для участков улично-дорожной сети такие параметры, как средняя скорость сообщения, пропускная способность и др. Применение разработанных в диссертации моделей и программ в совокупности с решением задачи автоматизированной обработки видеопотока с камер, расположенных на основных перекрестках города Челябинска, и получения параметров транспортных потоков даёт возможность повысить среднюю пропускную способность отдельных участков сети не менее чем на 15%.

Начальник АСУДД

ЛЮ.В. Воителев