

На правах рукописи

Чечина Антонина Александровна

Математическое моделирование транспортных потоков на основе теории
клеточных автоматов

Специальность 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

Автореферат на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном учреждении "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук".

Научный руководитель: к. ф.-м. н., с.н.с. Чурбанова Наталья Геннадьевна, старший научный сотрудник ФГУ ФИЦ «ИПМ им. М.В. Келдыша РАН»

Официальные оппоненты: д. ф.-м. н. Кленов Сергей Львович, доцент кафедры общей физики в ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ).

д. ф.-м.н., профессор Киселев Алексей Борисович, профессор кафедры газовой и волновой динамики механико-математического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» (г. Москва)

Защита состоится 16 декабря 2021 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.237.01, созданного на базе ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 125047, Москва, Миусская пл., д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

https://keldysh.ru/council/3/D00202403/chechina_aa_diss.pdf

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
к.ф.-м.н.

Корнилина М. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Высокая загруженность автомобильных дорог транспортом – проблема, с которой сталкивается каждый житель большого города и его пригородов. Маятниковая миграция населения, вызванная сосредоточением рабочих мест в крупных городах, вместе с высокой стоимостью жилья, переносит проблемы заторов далеко за пределы мегаполиса. Растущее число автомобилей в расчете на душу населения только усугубляет эту проблему. Для улучшения транспортной ситуации требуется инструмент, позволяющий как управлять существующей транспортной инфраструктурой, так и планировать строительство новой, а также прогнозировать эффективность ограничительных мер, которые обычно бывают непопулярными (например, платная парковка на улицах города, ограничение въезда и др.)

Во многих мегаполисах мира успешно работает так называемая интеллектуальная транспортная система (ИТС), позволяющая в реальном времени отслеживать и вносить изменения в управление дорожным движением, выбирая самые эффективные решения.

В связи с появлением более мощных вычислительных ресурсов появилась возможность строить более сложные и приближенные к жизни математические модели транспортных потоков, учитывающие взаимодействие водителей с дорожными знаками, разметкой, светофорами и так далее, а также между собой. Моделирование на высокопроизводительных системах может позволить охватывать дорожные сети в масштабах целого города.

Появление в последние годы множества новых данных о потоках автотранспорта, собираемых датчиками и камерами видеонаблюдения, во-первых, открывает новые возможности для изучения закономерностей динамики потоков, а во-вторых, позволяет проводить точную калибровку моделей для использования в конкретном месте, что может улучшить качество прогнозов, полученных в рамках вычислительных экспериментов.

Все вышеперечисленное позволяет сделать вывод об актуальности и перспективности выбранного автором диссертации направления исследований.

Современное состояние исследований

Несмотря на более чем 70-летнюю историю развития моделирования движения автотранспорта, данная тема по-прежнему остается малоизученной. Первые модели, созданные в рамках макроскопического подхода, не обеспечивают необходимую точность и не воспроизводят многие свойства реальных транспортных потоков, которые наблюдаются экспериментально. Связано это, в первую очередь, с вынужденной экономией на вычислениях. По мере развития этой области моделирования, развивались и усложнялись применяемые методы и подходы одновременно с ростом производительности

компьютеров. С этим же связан и переход от макроскопических моделей, описывающих транспортный поток как сплошную среду, к микроскопическим моделям, которые отображают более тонкие взаимодействия, описывая движение каждого отдельного автомобиля, и дальнейшее усложнение этих моделей. Этот процесс идет до сих пор.

Выбранный для диссертационной работы подход на основе теории клеточных автоматов берет свое начало со статьи Нагеля и Шрекенберга 1992 года¹. За прошедшие годы выделилось два основных направления развития данного подхода: моделирование на городских сетях при помощи сложных структур на основе ячеек клеточных автоматов и исследования в рамках теории трех фаз Б. Кернера, дополняющие правила перемещения вдоль дороги из модели Нагеля-Шрекенберга.

Подход на основе теории клеточных автоматов очень удобен для описания различных поведенческих стратегий водителей, включающих ситуации дискретного выбора, поскольку основан не на уравнениях в частных производных, а на логических алгоритмах и условиях «если - то». Моделирование водительских стратегий и принятия решений во время движения в потоке – область в настоящее время мало исследованная и потому представляющая интерес.

Также до сих пор при решении задач транспортного моделирования редко встречается выполнение расчетов на высокопроизводительных системах, что, безусловно, является важным для масштабных расчетов на городских сетях.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью работы является создание новой математической модели транспортных потоков, учитывающей реальные особенности поведения водителей и их взаимодействия с дорожно-транспортной инфраструктурой, и комплекса программ, адаптированного для высокопроизводительных вычислительных систем, реализующего эту модель.

Для этого автором диссертации решены следующие задачи:

Построена двумерная (многополосная) модель, включающая алгоритмы для движения автотранспорта на различных элементах улично-дорожной сети: регулируемых и нерегулируемых перекрестках, участках дороги с расширением и сужением, прямых участках дороги и т.д. В модели учтены разные стили вождения и стратегии смены полос участников движения, рассмотрен объезд препятствий (например, автомобилей, попавших в ДТП).

Разработан модульный программный комплекс, позволяющий делать расчеты на указанных элементах УДС по отдельности (в последовательном режиме), а также собирать из данных элементов сети различной конфигурации и делать расчеты на них (в параллельном режиме).

Проведено тестирование алгоритмов и верификация модели и комплекса на тестовых задачах. Проведено сравнение полученных результатов с

¹ Nagel K., Schreckenberg M. A Cellular automaton model for freeway traffic // J. Phys. I France. – 1992. – V. 2. – P. 2221-2229

экспериментальными данными, взятыми из литературы, а также с расчетами, выполненными при помощи коммерческого пакета для моделирования движения автотранспорта Aimsun TSS².

Научная новизна

Работа сочетает в себе два свойства, редко встречающихся в работах других исследователей (даже по отдельности): во-первых, учет при моделировании стратегий вождения, а во-вторых – адаптацию модели для расчетов на суперкомпьютерах. В этом основное отличие представленных модели, алгоритмов и программного комплекса от других.

Созданная модель на основе теории клеточных автоматов является новой и оригинальной. Входящие в модель алгоритмы проезда различных элементов УДС, а также алгоритмы взаимодействия водителей с дорожной инфраструктурой и с другими водителями, алгоритмы, реализующие различные стратегии поведения на дороге, и программный комплекс для высокопроизводительных вычислительных систем, реализующий модель, также являются новыми и оригинальными.

Теоретическая и практическая значимость работы

В теоретической части, созданные новые алгоритмы, учитывающие разные стратегии поведения в транспортном потоке, а также реализация этих алгоритмов в виде комплекса программ для высокопроизводительных систем, представляет интерес как основа для создания новых подходов к моделированию автотранспорта.

В практической части, созданная модель и программный комплекс могут служить базой для интеллектуальных транспортных систем городов, позволяя управлять транспортными потоками в режиме реального времени, а также решать прогнозные задачи при планировании новой и модификации существующей дорожно-транспортной инфраструктуры.

Методика исследования

Подход, основанный на теории клеточных автоматов, максимально хорошо подходит для описания сложных разнородных систем, какими являются транспортные потоки. Одно из преимуществ подхода – его дискретная логическая основа, которая позволяет легко описывать принятие решений водителями при движении и взаимодействии с другими участниками дорожного движения.

Созданная модель основана на одномерной модели Нагеля-Шрекенберга. Модель обобщена на многополосный случай путем добавления набора правил для смены полосы в различных условиях. Вместо одномерной расчетной области имеем двумерную; автомобили могут перестраиваться и обгонять друг друга. Правила обновления состояния ячеек из модели Нагеля-Шрекенберга, состоящие из четырех шагов, описывающих движение вдоль дороги, дополнены разветвленными логическими алгоритмами для перестроений. Для

² <https://www.aimsun.com>

моделирования движения в городе в модель добавлены элементы управляющего воздействия, такие, как дорожные знаки, сигналы светофора и разметка.

Поведение водителей на дороге может существенно отличаться в зависимости от их личностных качеств, стажа вождения и других параметров. Учет этих стратегий облегчает калибровку модели при практическом моделировании на участках дорожных сетей реальных городов (например, в больших городах стиль вождения, как правило, носит более агрессивный характер, а в городах с неинтенсивным движением – более спокойный). Также, как известно, частая смена полосы отдельными водителями может существенно влиять на весь транспортный поток, порождая волны уплотнений при стесненном движении, даже при отсутствии физических препятствий на дороге.

Для учета разной манеры вождения в модель включены «агрессивные» и «осторожные» водители, а для реалистичного моделирования проезда участка с сужением, при котором обычно водители пропускают автомобили из ряда с препятствием по одному (“zipper merge” или «елочка») – алгоритм «вежливый водитель».

Для верификации созданной модели и алгоритмов решен ряд тестовых задач, выполнено сравнение с экспериментальными данными, данными, полученными с использованием других моделей (взятыми из литературы) и результатами моделирования при помощи коммерческого пакета для транспортного моделирования. Выполнены расчеты на небольших дорожных сетях в параллельном режиме на суперкомпьютере К-100³ (ИПМ им. Келдыша РАН).

Достоверность полученных результатов

Тестовые расчеты согласуются с экспериментальными данными. Сравнение с расчетами, полученными другими исследователями и с помощью коммерческого пакета Aimsun TSS, демонстрируют сходство основных закономерностей, однако, обеспечивают более детализированные данные и большее сходство с экспериментом.

Апробация работы, внедрение

Работа была апробирована на ряде научных конференций и семинаров:

1. “Two approaches to the vehicular traffic flows simulation using high-performance computer systems”. International Interdisciplinary Seminar “Mathematical Models and Modeling in Laser-Plasma Processes and Advanced Science Technologies”, May 30 – June 6, 2015, Petrovac, Montenegro.
2. “Simulation of multilane vehicular traffic on the basis of cellular automata theory”, International Interdisciplinary Seminar “Mathematical Models and Modeling in Laser-Plasma Processes and Advanced Science Technologies” July 4-9, 2016, Moscow, Russia.

³ <https://www.kiam.ru/MVS/resourses/k100.html>

3. “Multilane Traffic Flow Modeling Based on Cellular Automata Theory Using High-performance Computer Systems”. 5th European Seminar on Computing (ESCO 2016), June 5-10, 2016, Pilsen, Czech Republic.
4. “Multilane traffic flow modeling using cellular automata theory”. International Conference on Mathematical Modeling and Computational Physics (MMCP’2017), July 3-7, 2017, Dubna, Russia.
5. “Traffic flow modelling on road networks using cellular automata theory”, International Conference on Communication, Management and Information Technology (ICCMIT2018), April 02-04, 2018, Madrid, Spain.
6. “Cellular automata in application to traffic flow simulation”, Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль-Хорезми 2018, 13–15 сентября 2018 г., Ташкент, Узбекистан.
7. «Моделирование и визуализация транспортных потоков на элементах дорожной сети с использованием теории клеточных автоматов», XII мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019), 23-28 сентября 2019, Дивноморское, Геленджик, Россия.
8. “Simulation and visualization of vehicular traffic on road networks using high performance computing systems”. 19th International Conference of Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering, June 30-July 6, 2019, Rota, Cadiz, Spain.
9. “Reproduction of experimental spatio-temporal structures in traffic flows using mathematical model based on cellular automata theory”, International Conference on Communication, Management and Information Technology (ICCMIT2019), March 26-28, 2019, Vienna, Austria.
10. “Supercomputer Technology for Traffic Simulation in a Metropolis”. 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), Oct. 20-22, 2020, Vienna, Austria.
11. «Модель транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов для решения задач управления движением на городских дорожных сетях» 13 Конференция по проблемам управления МКПУ-2020, Конференция «Математическая теория управления и ее приложения» (МТУиП-2020). 6-8 октября 2020г., Санкт-Петербург, Россия.
12. «Алгоритмы поведения водителей в математической модели транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов» V Международная конференция Моделирование нелинейных процессов и систем (MNPS-2020), 16-20 ноября 2020 г., Москва, Россия.
13. «Алгоритмы поведения водителей в математической модели транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов», 79-я международная научно-методическая и научно-исследовательская конференция МАДИ, 25-30 января 2021г., Москва, Россия.

Гранты РФФИ, включающие результаты работы:

15-01-03445-а (2015-2017)

Разработка эффективных вычислительных технологий для решения крупномасштабных задач математической физики на многопроцессорных системах сверхвысокой производительности, руководитель – Кулешов А. А.

16-01-00347-а (2016-2018)

Моделирование потоков автотранспорта на больших транспортных сетях с использованием микроскопического и мультиагентного подходов, руководитель – Чурбанова Н. Г.

16-31-00087-мол-а (2016-2017)

Математическое моделирование многополосных транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов с использованием высокопроизводительных вычислительных систем, руководитель – Чечина А. А.

18-01-00405-а (2018-2020)

Развитие современных вычислительных технологий для моделирования крупномасштабных физических процессов с использованием высокопроизводительных вычислительных систем, руководитель - Кулешов А. А.

18-51-41001-Узб_г (2018-2019)

Высокоточные вычислительные алгоритмы для решения задач газовой динамики, фильтрации и динамики транспортных потоков с использованием современных суперкомпьютеров, руководитель - Якобовский М. В.

20-07-00528-а (2020-2022)

Разработка вычислительных технологий для исследования и визуальной интерпретации динамики транспортных потоков на улично-дорожной сети мегаполиса на базе систем сверхвысокой производительности, руководитель - Чурбанова Н. Г.

Созданный программный комплекс САМ-2D был внедрен при создании платформы поддержки принятия решений для проекта «Разработка архитектуры, принципов построения и программного обеспечения суперкомпьютерной информационно-аналитической платформы прикладного моделирования, прогнозирования и экспертиз транспортных процессов и систем в виде сетевой компьютерной лаборатории» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», Соглашение о предоставлении субсидии от 30.06.2014 г. № 14.604.21.0052.

На созданный в рамках диссертационного исследования программный комплекс САМ-2D (упрощенная версия) было получено свидетельство на программу для электронных вычислительных машин № 2016662572 от 15.11.2016.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Двумерная многополосная микроскопическая модель транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов
2. Алгоритмы движения на различных элементах улично-дорожной сети для созданной модели
3. Различные поведенческие алгоритмы водителей для созданной модели

4. Комплекс программ САМ-2D для моделирования движения автотранспорта на городской улично-дорожной сети, адаптированный для высокопроизводительных вычислительных систем, интегрированный с модулем пользовательского интерфейса и визуализации результатов
5. Результаты вычислительных экспериментов, полученные с помощью комплекса программ.

Объем и структура диссертации

Объем диссертационной работы – 136 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 90 наименований и двух приложений. Работа содержит 50 рисунков. Глава 1 содержит обзор основных существующих методов и подходов к транспортному моделированию, главы 2-4 содержат собственные исследования автора диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены краткие сведения об актуальности выбранной темы исследования, сделан обзор современного состояния исследований по теме, указаны цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, методика исследований, теоретическая и практическая значимость работы, достоверность полученных результатов, приведен список конференций, на которых представлялась работа, и список грантов РФФИ, включающих полученные в рамках работы над диссертацией результаты. Приведены основные положения, выносимые на защиту, а также объем и структура диссертационной работы.

В первой главе содержится обзор основных методов и подходов к транспортному моделированию – макроскопического, мезоскопического и микроскопического.

Первый подход – *макроскопический*, основанный на аналогии движения потока автомобилей и потока сжимаемой жидкости или газа. В основе моделей – адаптированные уравнения гидродинамики, чаще всего одномерные. В уравнения добавляют дополнительные члены, которые отвечают за «человеческий фактор». При этом работа идет с усредненными величинами, характеризующими поток, такими как плотность и скорость потока. Отдельные автомобили в данном подходе не рассматриваются.

Главный плюс макромоделей – в экономии вычислительных ресурсов, поскольку время расчета не растет с ростом числа автомобилей в системе (то есть, плотности). Однако, приближение сплошной среды, к которому относятся макромоделей, накладывает свои ограничения: для того, чтобы считать поток сплошной средой, расстояние между автомобилями должно быть порядка размеров самих автомобилей. Это соответствует синхронизированному, то есть достаточно плотному, потоку, где автомобили должны подстраивать свою скорость под скорость потока и скорость движения меньше свободных

скоростей для данной дороги. Другое ограничение, вытекающее из приближения сплошной среды – это то, что возможно рассмотрение только достаточно протяженных участков дорог, ведь в масштабах десятков и сотен метров физическими размерами автомобилей нельзя пренебречь.

Помимо перечисленных ограничений, есть еще ограничения, связанные со сложностью описания реакции водителей на светофоры и разметку, что важно при моделировании небольших участков с целью решений локальных задач управления дорожным движением.

Наконец, стратегии водителей в макромоделях должны быть одинаковыми.

Второй возможный подход – *мезоскопический*, он основан на уравнениях, выводятся из кинетических соображений, аналогично уравнениям физической кинетики. Основная переменная в этом подходе – фазовая плотность потока, представляющая собой распределение автомобилей по координате и скорости. Основные недостатки модели – те же, что и для макроскопических моделей.

И, наконец, третий существующий подход – *микроскопический*. В нем мы имеем дело с каждым автомобилем в отдельности. Существенная часть микроскопических моделей относятся к моделям следования за лидером, в центре внимания в них взаимодействие ведомого и головного автомобиля. Как правило, модели этого класса используют уравнения движения автомобилей, но есть и исключение – модели на основе теории клеточных автоматов.

Работа с каждым автомобилем отдельно позволяет сделать модель более гибкой для описания процессов на «микроуровне» – то есть в масштабах отдельных перекрестков. Микроскопический подход не имеет ограничений на плотность потока, можно описывать как очень разреженное, так и плотное движение. Запись уравнений движения в явном виде позволяет точнее описывать паттерны торможения и ускорения автомобилей в потоке в зависимости от скоростей и расстояний между ними, что важно для воспроизведения экспериментальных свойств трафика. С развитием компьютерных технологий проблема нехватки вычислительных ресурсов для расчетов с большим числом автомобилей на масштабных сетях уже не представляет проблемы.

Приводятся основные модели, относящиеся к каждому из подходов, а также рассматривается история развития клеточных автоматов как самостоятельной математической теории. Отдельный подраздел главы посвящен применению теории клеточных автоматов к транспортному моделированию.

Впервые теорию клеточных автоматов к транспортному моделированию применили Нагель и Шрекенберг в 1992 году. Трасса в модели Нагеля-Шрекенберга представляется в виде одномерной решетки, каждая ячейка которой может быть либо пустой, либо содержать частицу, обозначающую транспортное средство. Частицы перемещаются из одной ячейки в другую (свободную) в одном направлении. В случае однополосного движения они не

могут обгонять друг друга. Вся система – пространство, время, скорость – дискретна. Предметом рассмотрения является состояние всей системы в отдельные последовательные моменты времени. Скорость показывает, на сколько ячеек автомобиль перемещается за один шаг по времени. Ускорение происходит мгновенно между шагами. На каждом слое по времени происходит обновление состояния системы по определённым правилам с определёнными вероятностями. Обновление в модели Нагеля-Шрекенберга состоит из четырех шагов:

1) Ускорение. Скорость автомобиля i увеличивается на единицу, если максимальная разрешенная скорость не достигнута:

$$V_i \rightarrow \min(V_i + 1, V_{\max})$$

2) Торможение. Скорость автомобиля уменьшается на единицу, если есть угроза столкновения с впереди идущим автомобилем:

$$V_i \rightarrow \min(V_i, D_i - 1), \quad \text{где } D_i \text{ - расстояние до впереди идущего автомобиля.}$$

3) Случайные возмущения. Если скорость автомобиля положительна, то она может быть уменьшена на единицу с некоторой вероятностью:

$$V_i \rightarrow \max(V_i - 1, 0) \text{ с вероятностью } p.$$

4) Движение. Каждый автомобиль продвигается вперед на количество ячеек, соответствующее его новой скорости после выполнения предыдущих шагов:

$$X_i \rightarrow X_i + V_i.$$

Для упрощения записи считаем, что скорость и расстояние измеряются в ячейках, а время безразмерно. По этой причине величины можно складывать, вычитать и сравнивать друг с другом.

Каждый шаг по времени состояние ячеек обновляется, автомобили передвигаются вдоль решетки на целое число ячеек.

Длина ячейки равна 7.5 м, что соответствует средней длине участка дороги, занимаемым автомобилем, стоящим в пробке (исходя из экспериментальных значений). Максимальная скорость $V_{\max} = 5 \frac{\text{ячеек}}{\text{шаг по времени}}$.

Исходя из проведенных вычислительных экспериментов, средняя скорость, отвечающая свободному движению, оценивается как $4.5 \frac{\text{ячейки}}{\text{шаг по времени}}$;

этому значению ставится в соответствие экспериментальное значение скорости свободного движения – 120 км/ч (33,3 м/с). Простой расчет позволяет, исходя из этих данных, оценить шаг по времени, который получается примерно

$$\text{равным 1 секунде: } \frac{7.5 \frac{\text{метров}}{\text{ячейку}} \times 4.5 \frac{\text{ячеек}}{\text{шаг по времени}}}{33.3 \text{ м/с}} \approx 1 \text{ с.}$$

Отсюда следует, что «шаг по скорости» $\Delta V = \frac{\Delta X}{\Delta T} = 27 \text{ км/ч}$.

Эти значения используются в большинстве созданных впоследствии моделей.

Модель Нагеля-Шрекенберга до сих пор остается одной из важнейших моделей транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов, множество существующих современных моделей основано на четырех правилах Нагеля-Шрекенберга. В первой главе диссертационной работы далее приводится обзор современных моделей на основе теории клеточных автоматов.

Во второй главе представлена созданная автором диссертационной работы двумерная математическая модель транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов, а также алгоритмы, входящие в нее.

В основу многополосной модели положена одномерная модель Нагеля-Шрекенберга, которая обобщается на двумерный случай. Трасса в этом случае представляет собой двумерную решетку, где количество ячеек в поперечном направлении соответствует числу полос трассы, как показано на рисунке 1:

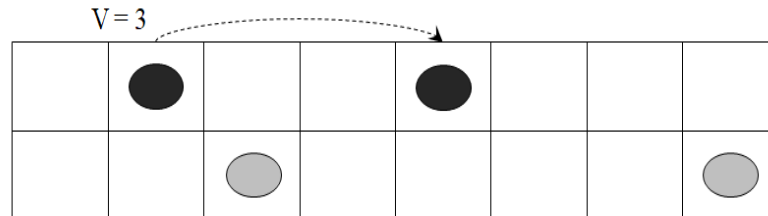


Рисунок 1 - Расчетная область в обобщенной двумерной микроскопической модели

В многополосной модели разрешены перестроения машин из полосы в полосу и обгоны. Процесс обновления состояний ячеек делится на два шага:

- смена полосы при необходимости и наличии возможности;
- движение вперед по правилам однополосного движения.

Размер ячейки расчетной области равен 7,5 метрам в длину и 3,5 метрам в ширину. Эти параметры соответствуют средней площади, занимаемой легковым автомобилем, стоящим на дороге, с учетом минимального необходимого расстояния до соседних автотранспортных средств. Ширина ячейки соответствует стандартной ширине полосы автомобильной дороги.

В двумерную микроскопическую модель в качестве параметров входят две вероятностные характеристики: вероятность спонтанного снижения скорости из модели Нагеля-Шрекенберга и вероятность остаться в своей полосе в случае, когда перестроение возможно и выгодно водителю. Первый параметр соответствует ситуациям, когда водитель, например, посчитал состояние дорожного полотна потенциально опасным или вынужден отвлечься на что-то во время движения и по этой причине принимает решение временно снизить скорость. Второй параметр характеризует наличие водителей, не склонных лишней раз менять полосу движения, даже если это позволит ехать быстрее. Другой причиной отказа от перестроения может быть нерешительность водителя или отсутствие опыта.

Как и в случае одномерного движения, АТС характеризуется текущей и максимальной скоростью. Скорость принимает целые значения от 0 до 4, а при

высоких скоростных режимах, и более. Максимальная скорость равна $V_{max} = 4 \frac{\text{ячейки}}{\text{шаг по времени}}$. Если шаг по времени равен одной секунде, то дискретному значению скорости 4 соответствует скорость 108 километров в час, то есть скорость свободного движения автомобиля по автомагистрали. Так как правилами дорожного движения в России скорость ограничена 110 км/ч, нам нет смысла рассматривать $V_{max} = 5 \frac{\text{ячеек}}{\text{шаг по времени}} = 135 \text{ км/ч}$, как в модели Нагеля-Шрекенберга.

Ускорение в модели – это число единиц, на которое автомобиль может поменять скорость за один временной шаг. Важно сопоставлять это значение с реальным возможным ускорением автомобиля при движении. С этой точки зрения для более адекватного описания физического движения автомобиля при заданных параметрах ячеек и шага по времени не имеет смысла менять скорость автомобиля более чем на одну единицу за один шаг по времени.

Модель обеспечивает возможность достижения автомобилями цели. Целями автомобилей при многополосном движении могут быть, например, съезд с дороги или поворот в определенную сторону на светофоре. В обоих случаях машины, начиная с определенного момента времени, стремятся перестроиться в целевую полосу, игнорируя значения плотности и скорости на ней. Таким образом, в описываемой модели для каждой машины необходимо хранить параметр цели. Некоторые автомобили не достигают цели, если не смогли вовремя перестроиться в полосу, из которой разрешен поворот или съезд. Это происходит из-за того, что нужная полоса занята другими транспортными средствами. Модель предусматривает гибкий подход к достижению автомобилем его цели: число автомобилей, которые не достигли цели, может уменьшаться за счет разрешения поворотов из большего числа полос, усложнения алгоритма перестроения или за счет реализации алгоритма «вежливый водитель». Алгоритм заставляет водителей в целевой полосе пропускать машины, которые хотят перестроиться.

Каждый автомобиль в модели имеет набор параметров, таких как уникальный номер (ID), текущая скорость, максимальная скорость, конечная цель. Имеются также вспомогательные параметры, упрощающие выполнение логических операций. В модели, однако, мы оперируем именно с ячейками, а не с автомобилями. Наличие автомобиля и набор его характеристик – это свойство данной ячейки на данном шаге по времени. Все параметры, кроме скорости, в пустых ячейках равны значениям по умолчанию, мы их не используем. Если скорость в ячейке с автомобилем принимает значение от 0 до 4 и соответствует скорости автомобиля, то параметр скорости пустой ячейки полагается равным -1, ячейки с неподвижным препятствием -10. Эти значения используются для построения алгоритмов движения.

Рассмотрим сначала самый простой и самый общий случай – движение по участку дороги без перекрестков, светофоров, сужений/расширений и т.д. Итак,

на каждом шаге по времени обновление состояния ячеек в модели происходит в два этапа:

А) Для каждого АТС выясняется возможность и необходимость смены полосы. Производится смена полосы.

Б) Производится движение вперед по выбранной полосе по правилам однополосного движения.

В самом общем виде алгоритм смены полосы А) можно записать так:

- 1) Проверка четности номера шага по времени. На четных шагах происходит смена полосы направо, на нечетных – налево: если $step \% 2 = 0$ $wmr = true$, $wml = false$; иначе $wmr = false$, $wml = true$.

Здесь $wml(r) = true/false$ – переменная, обозначающая, состоится или не состоится смена полосы налево/направо соответственно. Изначально ее значение – true (перестроение состоится). Дальнейшая последовательная проверка условий переопределяет значение переменной (или может оставлять без изменений).

- 2) Выгодно ли перестроение: если $d_{m,k\pm 1} \leq d_{m,k}$ или $v_{m,k\pm 1} < v_{m,k}$ то $wml(r) = false$ (здесь $d_{m,k}$ – расстояние до а/м в данной полосе, $d_{m,k\pm 1}$ – расстояние до а/м в целевой полосе, $v_{m,k}$ и $v_{m,k\pm 1}$ – скорости этих автомобилей, m – номер ячейки, k – номер полосы).
- 3) Есть ли препятствие на этой полосе: если существует $m: i < m \leq i+10$, $v_{m,k} = -10$ то $wml(r) = true$ (m – номер ячейки впереди, $v_{m,k} = -10$ соответствует неподвижному препятствию).
- 4) Свободна ли целевая ячейка: если $v_{i,k\pm 1} \neq -1$ то $wml(r) = false$ ($v_{i,k\pm 1} = -1$ соответствует пустой ячейке)
- 5) Условие безопасности: если $d_{m,k\pm 1}^{prev} < V$ то $wml(r) = false$ ($d_{m,k\pm 1}^{prev}$ – расстояние до предыдущего автомобиля в целевой полосе, $v_{i,k\pm 1}^{prev}$ – его скорость, V – величина, выбираемая исходя из стиля вождения данного водителя. $V = v_{max}$ или $V = v_{i,k\pm 1}^{prev}$ для «осторожных» или «агрессивных» водителей соответственно, более подробно об этом будет рассказано ниже).
- 6) Стохастический элемент: если $p < rand()$ то $wml(r) = false$ (p – заданная вероятность, $rand()$ – случайная величина).

Как и в оригинальной модели Нагеля-Шрекенберга, считаем, что скорость и расстояние измеряются в ячейках, а время безразмерно и эти величины можно складывать, вычитать и сравнивать друг с другом.

Шаг 1 отвечает за проверку четности номера шага. Перестроение направо на четных шагах, налево на нечетных шагах выполняется с целью избежания конфликтов при числе полос больше двух, когда автомобили, расположенные «через ряд» друг от друга, могут претендовать на одну и ту же ячейку в ряду посередине. Шаг 2 определяет желание водителей двигаться в более быстром и/или более свободном ряду. Шаг 3 проверяет, есть ли препятствие впереди на текущей полосе (если оно есть, водитель принимает решение в пользу перестроения, даже если целевой ряд более медленный). Также происходит

проверка наличия препятствия в целевой полосе. Шаг 4 определяет, свободна ли целевая ячейка. Шаг 5 проверяет условие безопасности. Для безопасного перестроения расстояние между целевой ячейкой и автомобилем, движущимся по целевой полосе и подъезжающим к этой ячейке, должно быть достаточным. Достаточность расстояния определяется скоростью автомобиля в целевой полосе и стилем вождения управляющего перестраивающимся транспортным средством. Соответственно, расстояние, которое водитель считает безопасным, может отличаться. На шаге 6 перестроение может с некоторой вероятностью отмениться, даже если выполнены все условия для смены полосы.

Алгоритм Б) движения вдоль дороги аналогичен, за некоторыми исключениями, четырем шагам из модели Нагеля-Шрекенберга, приведенным выше.

Для созданной модели разработаны алгоритмы движения на элементах улично-дорожной сети (УДС) с управляющей инфраструктурой. На рисунке 2 представлены примеры моделирования движения на таких элементах.

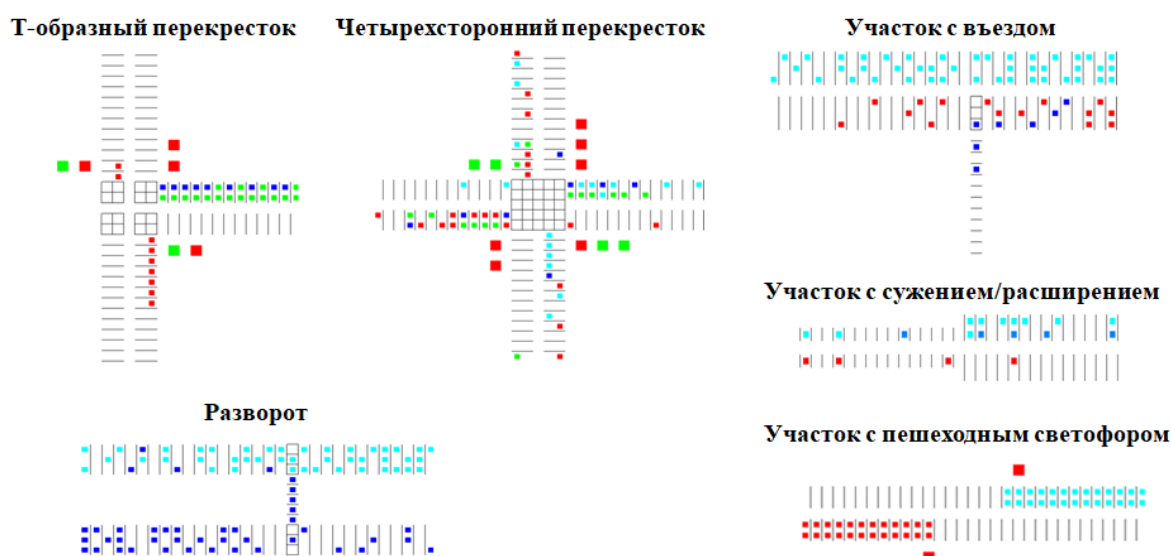


Рисунок 2 - элементы УДС

Мелкие квадраты представляют автомобили, разные цвета отвечают разным целям. Более крупные квадраты – это светофоры (каждый квадрат соответствует своему направлению движения – налево, прямо или направо). Представленные на рисунке 2 изображения – это стоп-кадры визуализации расчетов, выполненных при помощи созданной модели.

В диссертационной работе представлены все алгоритмы, отвечающие за движение по элементам УДС. Здесь приведем некоторые из них.

Алгоритм прохождения регулируемого четырехстороннего перекрестка со светофором

При прохождении регулируемого четырехстороннего перекрестка смена полосы происходит по алгоритму перестроения с достижением цели. Движение вперед происходит согласно алгоритму из модели Нагеля-Шрекенберга, однако при подъезде к перекрестку в него добавляются новые условия. Следующие

правила применяются для того, чтобы автомобиль мог замедляться перед перекрестком и останавливаться на светофоре, а также поворачивать:

- 1) Замедление за D_2 ячеек перед поворотом: если $d_{i,k,j} < D_2$ то $v_{i,k,j} = \min(v_{i,k,j} - 1, 1)$ ($d_{i,k,j}$ – расстояние до перекрестка, D_2 – фиксированное расстояние, $v_{i,k,j}$ – скорость автомобиля, i – номер ячейки, k – номер полосы, j – номер дороги).
- 2) Остановка в точке поворота: если $d_{i,k,j} = 0$ то $v_{i,k,j} = 0$.
- 3) Замедление и остановка на красный: если $reg = R$ то при $d_{i,k,j} > 0$ $v_{i,k,j} = \min(v_{i,k,j} - 1, 0)$, при $d_{i,k,j} = 0$ то $v_{i,k,j} = 0$ (reg – режим светофора, R соответствует красному сигналу для данного направления)
- 4) Поворот/смена дороги j : если $v_{i,k,j} = 0$ и $reg \neq R$ и $k = k^{goal}$ и $v_{i^*,k^*,j^*} = -1$ (целевая ячейка свободна) то $v_{i,k,j} \rightarrow v_{i^*,k^*,j^*}$ (здесь k^{goal} – целевая полоса, из которой разрешен поворот)
- 5) Движение прямо, если текущая полоса не предполагает поворот и целевая ячейка свободна: если $v_{i,k,j} = 0$ и $reg \neq R$ и $k \neq k^{goal}$ и $v_{i+1,k,j} = -1$ то $v_{i,k,j} \rightarrow v_{i+1,k,j}$

Если цель машины поворот на перекрестке, и она находится в пределах D_2 клеток от поворота, то ее скорость уменьшается, пока не достигнет 1. При достижении точки поворота машина останавливается.

Если горит красный сигнал светофора, автомобиль, подъезжающий к перекрестку, замедляется, в ячейке перед перекрестком он останавливается. Когда загорается зеленый, автомобиль снова начинает движение.

Если цель автомобиля – поворот на перекрестке (номер дороги, соответствующий цели, предполагает поворот) и он находится в полосе, из которой данный поворот разрешен, он поворачивает. Это означает, что он попадает в соответствующую ячейку другой дороги, проверив, что она не занята.

Алгоритм обеспечения безопасности на перекрестке

Рассмотрим реализацию поворотов более подробно. Расчетная область всех элементов УДС состоит из четырех независимых участков. Для четырехстороннего перекрестка эти участки – направления движения (обозначены цифрами 0-3 на рисунке 3). Обозначения направлений следующие: движение снизу вверх – $j=0$, сверху вниз – $j=1$, справа налево – $j=2$, слева направо – $j=3$.

Каждое направление, или дорога, может иметь любое количество полос.

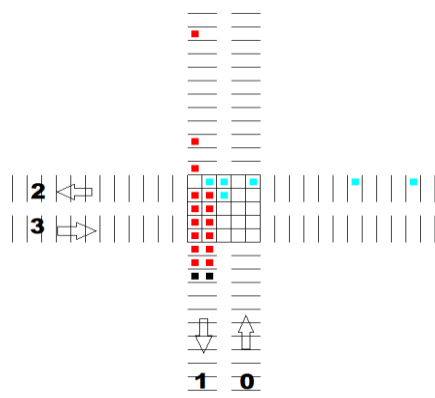


Рисунок 3 - схема движения на четырехстороннем перекрестке

Если моделируется, скажем, прямой участок УДС, то мы «выключаем» лишние направления (просто взяв входящие потоки по данным направлениям равными нулю) и взаимодействие этих направлений с актуальными.

При описании пересечений дорог различных типов необходимо, разумеется, описать взаимодействие пересекающихся направлений. В данном случае при расчете движения на четырехстороннем перекрестке у направлений 0-3, 0-2, 1-3, 1-2 имеются общие области. Они вместе с «разделительными полосами» в одну клетку, имеющимися между направлениями 0-1 и 2-3, образуют область перекрестка.

Для учета нахождения автомобилей на перекрестке создается матрица $cross[x][y]=v_{j1} + v_{j2}$, где v_{j1} и v_{j2} – значения скоростей в соответствующих ячейках по направлениям $j1$ и $j2$, x и y – переменные, нумерующие элементы матрицы перекрестка. Если ячейка расчетной области пустая, значение скорости в ней равно -1. Таким образом, элемент матрицы равен -2 тогда и только тогда, когда ячейка перекрестка пустая.

При подъезде автомобиля к границе перекрестка происходит обращение к соответствующему элементу матрицы $cross[x][y]$ для проверки наличия автомобилей. Если целевая ячейка занята, автомобиль останавливается и ждет, когда она освободится. На следующем шаге он может попробовать перестроиться в другой ряд и повторить попытку проехать.

Ряд алгоритмов отвечает за описание особенностей поведения водителей. Так, водители могут быть «осторожными», «агрессивными» и «вежливыми». Характеристика «осторожный/агрессивный» отвечает за минимальное расстояние в целевой полосе, необходимое для того, чтобы данный водитель счел перестроение безопасным. Характеристика «вежливый» предназначена для описания ситуаций, в которых водитель пропускает другие автомобили. Рассмотрим данный алгоритм подробнее.

Алгоритм «вежливый водитель» для смены полосы

Алгоритм «вежливый водитель» (“cooperative driver”) состоит из двух частей. Первая часть – модифицированный алгоритм смены полосы при наличии в системе вежливых водителей (рисунок 4). Вторая часть – присвоение водителю статуса «вежливый».

Вежливые водители в системе отмечены при помощи дополнительного параметра, описывающего состояние каждой ячейки - cd , который принимает значения да/нет (1 или 0). Напомним, что каждая ячейка имеет набор параметров, позволяющий сохранить всю необходимую информацию об автомобиле: его скорость, максимальная скорость, идентификационный номер ID, точка назначения (номер выезда), время въезда в расчетную область, а также ряд других вспомогательных параметров. Среди этих параметров есть индикаторы желания перестроиться направо/налево ($lchr(l)$, lane change right/left), которые не учитывают условия безопасности, то есть, они определяют не окончательное решение о перестроении, а лишь намерение поменять полосу. Эти параметры в модели выполняют ту же роль, что и «поворотники» в настоящем автомобиле. Другие водители могут их видеть и, при определенных обстоятельствах, принимать во внимание и замедляться или пропускать автомобиль, который хочет перестроиться, а могут и игнорировать.

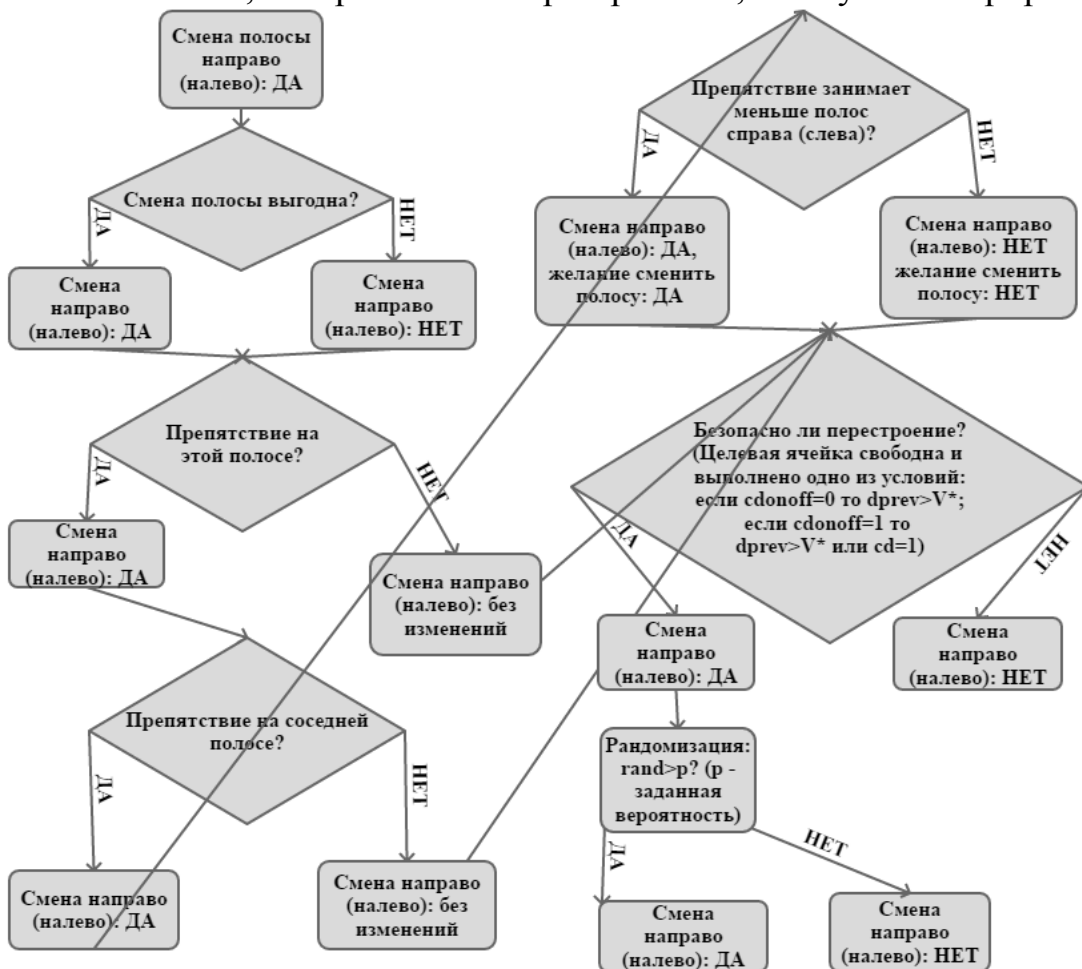


Рисунок 4 – Алгоритм перестроения при наличии «вежливых» водителей

Первая часть алгоритма является алгоритмом смены полосы при наличии препятствия. Отличие начинается после проверки, занимает ли препятствие меньше полос с той стороны, куда предполагается перестроение. В данном месте параметр wmr/wml сохраняется в переменную, обозначающую желание

перестроиться. Если в результате указанных действий параметр имеет значение true, автомобиль «включает поворотник».

Далее происходит проверка безопасности перестроения. Она выглядит по-разному для расчета с «вежливыми» водителями ($cdonoff=1$) и без них ($cdonoff=0$). Если в системе нет «вежливых» водителей, то проверяется условие $d^{prev} > V^*$, где d^{prev} – расстояние до предыдущего автомобиля в целевой полосе, а V^* – скорость для сравнения, зависящая от особенностей стратегий водителей («агрессивных» и «осторожных»). При наличии в системе «вежливых» водителей ($cdonoff=1$) условие безопасности $d^{prev} > V^*$ уже может быть избыточно жестким, так как вежливые водители специально тормозят и останавливаются, чтобы пропустить других, и водитель с включенным «поворотником» может безопасно перестроиться вплотную перед стоящим автомобилем с «вежливым» водителем. Таким образом, совместно с условием безопасности проверяется, является ли водитель предыдущего автомобиля в целевой полосе «вежливым» ($cd=1$) на данный момент. О том, как водители в системе становятся «вежливыми», будет изложено далее.

Соответственно, если условие безопасности не выполнено, смена полосы отменяется.

Следующим шагом в алгоритме является рандомизация. Водитель, желающий поменять полосу и имеющий такую возможность, тем не менее, может передумать перестраиваться с некоторой заданной вероятностью p . Затем, если водитель не передумал, происходит перестроение.

Далее рассмотрим, в каких условиях водителю присваивается статус «вежливый». Это переменная величина, которая переопределяется каждый шаг по времени, однако можно задать определенное правило, по которому только часть водителей может стать вежливыми в процессе расчета. В нашем случае в качестве определяющего параметра служит идентификационный номер (ID), присваиваемый при добавлении автомобиля в систему. Половина водителей (с четными ID) могут стать «вежливыми», а другая половина – нет.

Присвоение параметра $cd=1$ происходит непосредственно перед сменой полосы, после выполнения всех шагов рис. 1. Таким образом, использоваться этот параметр в алгоритме будет только на следующем шаге по времени. Для случая перестроения условия для того, чтобы водитель стал «вежливым», следующие:

- $step \% 2 = 0$ для wmr ($step \% 2 = 1$ для wml)
- «Поворотник» автомобиля в полосе с препятствием включен: $lchr(l) = true$.
- Скорость автомобиля в полосе с препятствием $v_{i,k \pm 1}^{prev} = 0$. В полосе с препятствием уже образовался затор.
- Скорость данного автомобиля $-1 < v_{i,k} \leq 1$. Он либо уже остановился, либо его скорость достаточно мала для полной остановки.
- Номер данного автомобиля в системе $ID \% 2 = 0$ (или другое условие, определяющее соотношение «вежливых» водителей и всех остальных),

- $cd \neq -1$ ($cd = -1$ после того, как водитель пропустил автомобиль из соседнего ряда и тот перестроился).

Последнее условие служит для того, чтобы один и тот же водитель, став вежливым, не пропускал сразу много машин из соседнего ряда, а сам начинал движение, пропустив только одну. Таким образом моделируется так называемое перестроение «елочкой», когда водители из свободного ряда пропускают по одному автомобилю из ряда с затрудненным движением. Практика показывает, что такой подход проезда участка с неподвижным препятствием наиболее эффективен.

Все созданные алгоритмы верифицированы с помощью тестовых задач, показывающих адекватность их работы.

Третья глава посвящена численной реализации созданной модели и алгоритмов. Программный комплекс, получивший название САМ-2D (Cellular Automata 2-Dimensional), написан на языке C/C++ и использует библиотеку Glut для визуализации расчетов. Визуализация при помощи Glut происходит одновременно с расчетом и позволяет отлаживать программу и анализировать результаты. Пример такой визуализации представлен, например, на рисунке 3.

Программный комплекс имеет модульную структуру, каждый модуль отвечает за расчет одного элемента УДС, реализуя соответствующие алгоритмы, представленные в Главе 2: прямолинейный участок, перекресток (включая различные типы и настройки светофоров), участок с расширением/сужением, въезд/выезд с автомагистрали, участок с разворотом, участок с пешеходным светофором и т. д.

Для расчетов на дорожных сетях была создана параллельная версия программы. Так как логические операции плохо поддаются распараллеливанию на графических ускорителях (GPU), был выбран вариант реализации параллельной версии на CPU. Параллельная версия программного комплекса САМ-2D написана на языке C/C++. Отладка и тестовые расчеты выполнены на суперкомпьютере K-100 ЦКП ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Созданной модели транспортных потоков присущ как геометрический параллелизм, так и параллелизм данных. Для реализации был выбран первый вариант. Расчетная область – часть городской улично-дорожной сети – разделяется на отдельные элементы: перекрестки, прямые участки дороги, участки с въездами и съездами и т.д. Границы проходят по участкам без особенностей, обеспечивая простоту передачи данных.

Из модулей, как из конструктора, можно собирать любые сети, соответствующие реальной карте города.

Для того чтобы программный комплекс был универсальным, модули, отвечающие за моделирование на отдельных участках УДС, стандартизированы по размеру. Каждый модуль рассчитывается отдельно на своем процессоре, на границах происходит обмен данными при помощи библиотеки MPI. Автомобиль, выезжающий с одного элемента, появляется на другом, в месте, соответствующем его скорости на момент перехода.

В отличие от многих других задач, при моделировании с помощью клеточных автоматов недостаточно просто передать данные с одного процессора на другой. Перед передачей нужно убедиться, что автомобили, которые покидают один элемент, действительно могут попасть на следующий: их целевая ячейка, соответствующая текущей скорости, также как и все предшествующие ячейки, должна быть свободна.

Для удобства использования программного комплекса совместно с системными программистами был разработан модуль пользовательского интерфейса и визуализации данных. Веб-интерфейс позволяет задавать дорожную сеть, вводить начальные данные и параметры моделирования, а также получать результаты расчета, как в виде численных характеристик, так и в виде визуализации (дорог со светофорами и движущимися по ним автомобилями). Пример визуализации расчета для сети, состоящей из двух перекрестков (Т-образного и четырехстороннего) представлен на рисунке 5. Данный расчет выполнен при помощи параллельной версии программного комплекса.

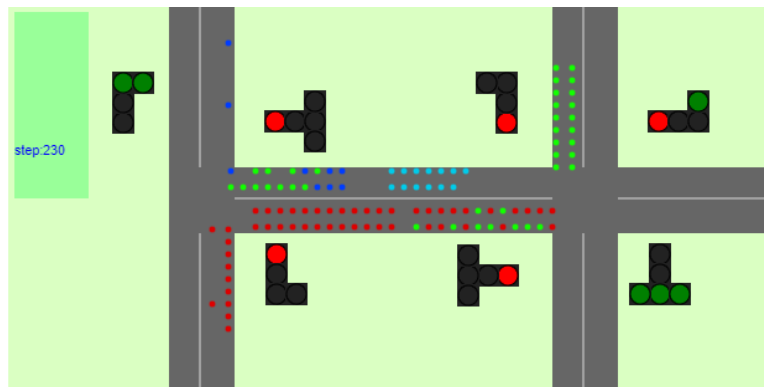


Рисунок 5 – результаты расчета на сети. Т-образный + четырехсторонний перекрестки

Четвертая глава посвящена верификации созданной модели, алгоритмов и программного комплекса. Для этого решается ряд тестовых задач и проводится сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, результатами других исследователей и результатами, полученными при помощи коммерческого пакета для транспортного моделирования Aimsun TSS.

В качестве первой из тестовых задач была выбрана задача о пропускной способности регулируемого четырехстороннего перекрестка. Целью этой задачи является поиск оптимального светофорного режима, а именно определение длительности сигналов светофоров, обеспечивающей минимальное время прохождения перекрестка всеми участниками движения.

Перекресток состоит из двух пересекающихся дорог, по которым автомобили движутся в двух направлениях и каждое направление имеет по две полосы. Светофор на перекрестке имеет 4 фазы работы, которые включаются последовательно. Меняя длительности фаз, при заданных потоках можно

получить разные значения пропускной способности. Результаты расчетов представлены на рисунке 6.

По оси абсцисс отложены номера режимов светофоров, по оси ординат – пропускная способность перекрестка в автомобилях в час. Верхняя кривая (красные маркеры в виде квадратов) – расчет при помощи Aimsun, нижняя (синие маркеры в виде ромбов) – расчет при помощи SAM-2D.

Из рисунка можно сделать вывод о том, какие режимы обеспечивают наибольшую и наименьшую пропускную способность перекрестка.

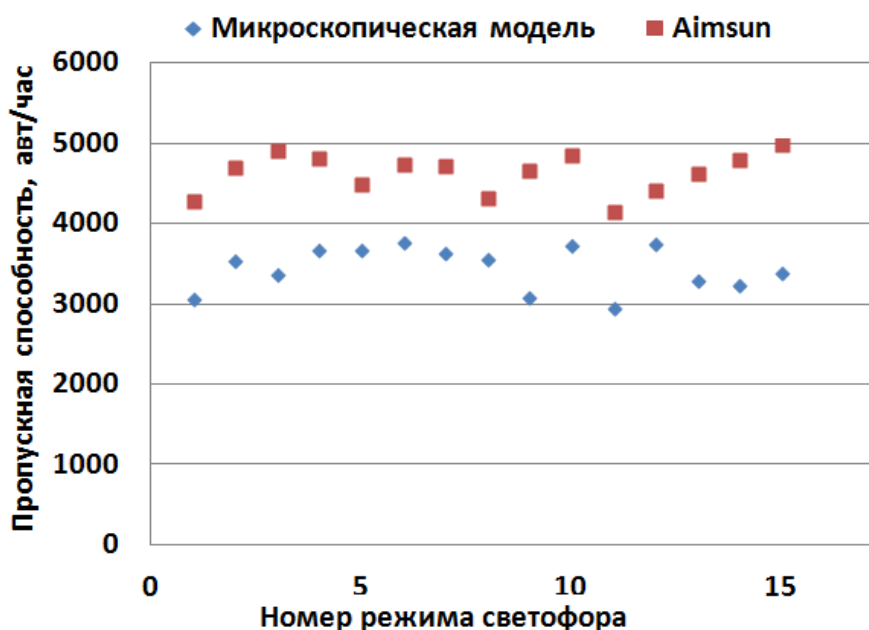


Рисунок 6 – Пропускная способность перекрестка при различных режимах работы светофора

Полученные результаты для микроскопической модели SAM-2D и для Aimsun TSS качественно совпадают. Количественного совпадения мы не ожидаем, этот вопрос решается калибровкой моделей.

Для сравнения с экспериментальными данными на рисунке 7 (слева) представлен фрагмент пространственно-временной диаграммы реального транспортного потока по автомагистрали, взятый из книги Б. Кернера⁴. По оси абсцисс отложено время (ч), по оси ординат – расстояние вдоль трассы (км), цветом представлена скорость автомобилей. Красные участки соответствуют затору (~0-10 км/ч), желтые – синхронизированный поток (~60-70 км/ч), белые участки – свободный поток (~110 км/ч).

Для сравнения выбрана задача о въезде на автомагистраль с переменным потоком, она взята из книги М. Трайбера⁵, стр. 141. Результат моделирования, взятый из данной книги, выполнен при помощи модели Кернера-Конхойзера и

⁴Kerner B. The physics of Traffic – Berlin: Springer, 2004. – 682 p.

⁵Treiber M., Kesting A. Traffic Flow Dynamics. Data, Models and Simulation –Berlin-Heidelberg: Springer, 2013. – 503 p.

представлен на рисунке 7 посередине. Результат моделирования при помощи пакета SAM-2D представлен на рисунке 7 справа.

Сравнивая рисунки, можно сделать вывод, что, хотя качественно результаты моделирования совпадают, однако, результат, полученный при помощи СА-модели гораздо ближе к характерным экспериментально наблюдаемым паттернам скоростей на пространственно-временной диаграмме.

Так как данная задача является модельной, и в реальных условиях потоки меняются по-другому, мы не ожидаем полного аналога полученных при помощи SAM-2D результатов эксперименту, где широкие движущиеся кластеры появляются и исчезают с течением времени. Еще одна причина отличия – участок реальной трассы содержит не один въезд, как в задаче, а несколько въездов и выездов. В остальном, полученная при моделировании картина отвечает всем ожидаемым критериям соответствия эксперименту.

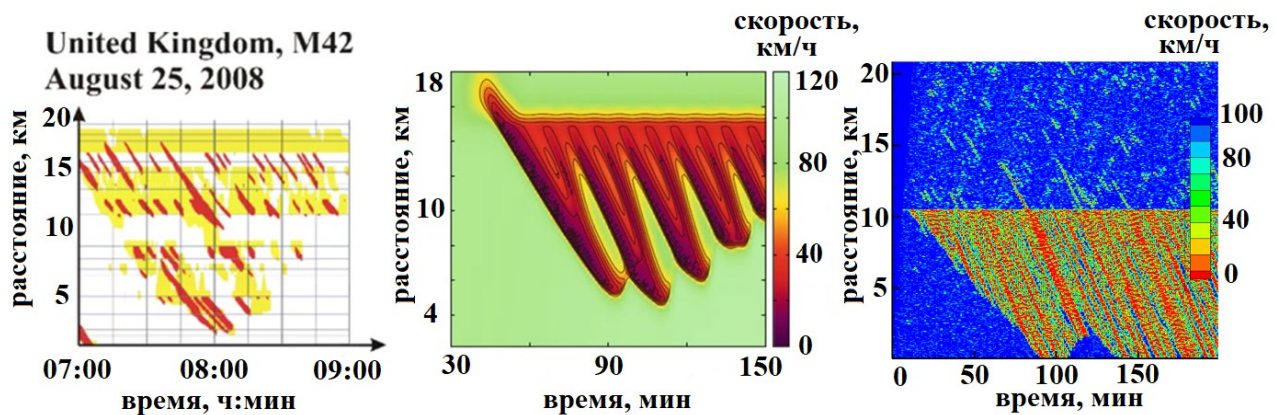


Рисунок 7 – Экспериментальная пространственно-временная диаграмма транспортного потока (слева), результат моделирования при помощи модели Кернера-Конхойзера (посередине), результат моделирования при помощи SAM-2D (справа).

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы. В рамках диссертационной работы было выполнено исследование истории развития транспортного моделирования и теории клеточных автоматов, проведен анализ методов и подходов к моделированию транспортных потоков, выполнено обоснование выбора направления исследования.

Были разработаны:

- Двумерная многополосная микроскопическая модель транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов SAM-2D,
- Алгоритмы движения на различных элементах улично-дорожной сети для созданной модели
- Различные поведенческие алгоритмы водителей для созданной модели
- Комплекс программ для моделирования движения автотранспорта на городской улично-дорожной сети, адаптированный для высокопроизводительных вычислительных систем, интегрированный с

модулем пользовательского интерфейса и визуализации результатов расчетов.

Были проведены:

- Вычислительные эксперименты, верифицирующие созданную модель, алгоритмы и программный комплекс.

Результаты, представленные в диссертации, были опубликованы в работах [1-17].

Обсуждаются дальнейшие перспективы развития созданных модели, алгоритмов и программного комплекса. В будущем планируется дальнейшее усложнение созданной модели, например, адаптация ее для описания движения грузового и общественного автотранспорта. Планируется при помощи пользовательского интерфейса реализовать интерактивное управление непосредственно в процессе расчета: смену светофорных режимов, добавление неподвижных препятствий и так далее. Планируется провести исследование оптимизации загрузки процессоров при параллельных расчетах.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в базы данных WoS, Scopus

1. Churbanova N., Chechina A., Trapeznikova M., Sokolov P. Simulation of traffic flows on road segments using cellular automata theory and quasigasdynamic approach // *Mathematica Montisnigri*. – 2019. – V. XLVI – P. 72-90.
<https://doi.org/10.20948/mathmon-2019-46-7>
2. Чечина А.А. Алгоритмы поведения водителей на нерегулируемых перекрестках с приоритетом и при объезде препятствий // *Математическое моделирование*. – 2021. – т. 33(9) – С. 47-59.
<https://doi.org/10.20948/mm-2021-09-04>
3. Чечина А.А., Чурбанова Н.Г., Трапезникова М.А.. Сравнение воспроизведения пространственно-временных структур транспортных потоков при использовании различных способов осреднения данных // *Математическое моделирование*. – 2021. – т. 33(1) – С. 25-31.
<https://doi.org/10.20948/mm-2021-01-02>
4. Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г. Двумерная модель клеточных автоматов для описания динамики транспортных потоков на элементах улично-дорожной сети // *Математическое моделирование*. – 2017. – т. 19 № 9 – С. 110-120.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=29972284>
5. Chechina A., Churbanova N., Trapeznikova M. Different Approaches to the Multilane Traffic Simulation // *Traffic and Granular Flow '13*. – 2015. – No. 19 – P. 361-368.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-10629-8_41
6. Churbanova N.G., Chechina A.A., Furmanov I. R., Trapeznikova M.A. Microscopic Model for Simulation of Traffic Flows on Multilane Highways and

Crossroads // ECCOMAS 2012 - European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, e-Book Full Papers. – 2012. – P. 11 - 17.
<http://eccomas.cimne.com/cvdata/cntr1/spc7/dtos/img/mdia/ECCOMAS-2012-e-book-Title-Content.pdf>

7. Chechina A., Churbanova N., Trapeznikova M. Multilane Traffic Flow Modeling Using Cellular Automata Theory // EPJ Web of Conferences. – 2018. – V. 173 – P. 06003.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201817306003>
8. Chechina A., Churbanova N., Trapeznikova M., Ermakov A., German M. Traffic flow modelling on road networks using cellular automata theory // Int. J. of Eng. & Techn. – 2018. – V. 7 N. 2.28 – P. 225-227.
<https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.28.12930>
9. Chechina A., Churbanova N., Trapeznikova M. Reproduction of experimental spatio-temporal structures in traffic flows using mathematical model based on cellular automata theory // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. – 2019. – V.7 No. 1 – P. 76-81.
<https://doi.org/10.21533/pen.v7i1.395>
10. Churbanova N., Chechina A., Trapeznikova M., Ermakov A., German M., Sokolov P., Bozorov O. CMMSE-2019: Simulation and visualization of vehicular traffic on road networks using high performance computing systems // Computational and Mathematical Methods. – 2020 - V. 2 No. 3 - e1082.
<https://doi.org/10.1002/cmm4.1082>
11. Chechina A., Churbanova N., Trapeznikova M. Modelling traffic on road junctions on parallel computing systems using cellular automata approach // International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM). – 2020. – V. 14 No. 10 – P. 178-185.
<https://doi.org/10.3991/ijim.v14i10.14549>
12. Trapeznikova M.A., Churbanova N. G., Chechina A.A., Ermakov A.V., German M.S. Supercomputer Technology for Traffic Simulation in a Metropolis // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH, Vienna, Austria, 2020) IEEE. – 2020. – P. 1-4.
<https://doi.org/10.1109/EMCTECH49634.2020.9261532>

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

13. Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г., Поляков Д.Б. Математическое моделирование потоков автотранспорта на основе макро- и микроскопических подходов // Вестник АГТУ Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2014. - №1 - С. 130-139.
<http://mi.mathnet.ru/rus/vagtu/y2014/i1/p130>
14. Чечина А.А. Новые алгоритмы перестроения автомобилей для микроскопической модели транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2017. – №136 – 14с.

<https://doi.org/10.20948/prepr-2017-136>

15. Чечина А.А. Воспроизведение экспериментальных пространственно-временных структур в транспортных потоках при помощи математической модели на основе теории клеточных автоматов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2018. – № 236 – 16 с.
<https://doi.org/10.20948/prepr-2018-236>
16. Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г. Описание динамики транспортных потоков на элементах улично-дорожной сети с использованием двумерных математических моделей // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2016. – №93 – 20 с.
<https://doi.org/10.20948/prepr-2016-93>
17. Чечина А.А., Герман М.С., Ермаков А.В., Трапезникова М.А., Чурбанова Н.Г. Моделирование и визуализация потоков автотранспорта на элементах улично-дорожной сети с использованием комплекса программ САМ-2D // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2016. – № 124 – 17 с.
<https://doi.org/10.20948/prepr-2016-124>

Свидетельства:

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа микроскопического моделирования транспортных потоков САМ-2D»
Правообладатель: ФГУ ФИЦ «ИПМ им. М.В. Келдыша РАН». Автор:
Чечина А.А. Свидетельство о государственной регистрации № 2016662572
от 15.11.2016.