

ОТ РЕДАКЦИИ

Данный специальный выпуск возник по итогам конференции «Транспортные потоки на сетях», проводившейся в Университете Сириус 24–28 апреля 2023 г. Пожалуй, это первая настолько представительная конференция вокруг математики транспортных потоков, проводимая на территории России за последние годы. В программный комитет вошли известные специалисты по моделированию транспортных потоков и смежных математических вопросов: Валерий Козлов (Математический институт им. В. А. Стеклова РАН), Борис Четверушкин (Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова), Александр Бугаев (Московский физико-технический институт), Марина Яшина (Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет), Ярослав Холодов (Университет Иннополис), Александр Гасников (Московский физико-технический институт), Андрей Райгородский (Московский физико-технический институт).

На конференции было четыре секции:

- 1) секция «Микроскопические модели транспортных потоков как динамические системы», посвященная памяти А. П. Буслаева (куратор М. В. Яшина);
- 2) секция «Статистическая физика и моделирование транспортных сетей», посвященная памяти В. А. Малышева (куратор В. В. Козлов);
- 3) секция «Интеллектуальный анализ данных в транспортных сетях» (куратор Я. А. Холодов);
- 4) секция «Равновесные модели транспортных потоков» (куратор А. В. Гасников).

Вокруг тематик первых двух секций были подготовлены две монографии: *Яшина М. В., Таташев А. Г.* Сети Буслаева: динамические системы потоков частиц на регулярных сетях с конфликтными точками. М.: УРСС, 2023; *Малышев В. А.* Кратчайшее введение в современные вероятностные модели. УРСС, 2024. Название первой книги во многом отражает научные интересы проф. Александра Павловича Буслаева, который долгие годы был одним из самых видных специалистов по математическому моделированию транспортных потоков в стране, и изначально конференция задумывалась М. В. Яшиной именно как конференция памяти Александра Павловича. Вторая секция посвящена ушедшему от нас в конце сентября 2022 года лауреату госпремии проф. МГУ Вадиму Александровичу Малышеву, заведующему лабораторией больших стохастических систем мехмата МГУ. В область его интересов входили вопросы изучения различных больших систем. Несколько важных работ им было сделано и по системам массового обслуживания в транспорте. В частности, именно В. А. Малышевым (в соавторстве с А. А. Замятиным) было получено изящное и строгое научное объяснение наблюдаемого в больших городах фазового перехода: если количество автомобилей, одновременно движущихся по дорогам, меньше некоторого порогового значения, то все движутся более-менее свободно; как только происходит небольшое превышение этого порога, начинается резкий рост среднего времени в пути и в системе начинают появляться пробки.

В целом в этот спецвыпуск вошли статьи на основе отобранных докладов на прошедшей конференции «Транспортные потоки на сетях». В основном отражение нашли доклады с секций 1, 3, 4. В продолжение секции 2 летом 2023 года в МГУ была отдельная конференция, посвященная памяти В. А. Малышеву, и было решено по итогам секции 2 и конференции в МГУ сосредоточиться на подготовке отдельного сборника. Секция 3 — «Интеллектуальный анализ данных в транспортных сетях» — посвящена анализу существующих алгоритмов адаптивного

управления трафиком в крупных мегаполисах. Решение задачи оптимального управления транспортными потоками в сети городских дорог не теряет своей актуальности на сегодняшний день. В последнее время все большую популярность приобретают нейросетевые алгоритмы управления дорожным движением. Несмотря на огромную значимость и востребованность решения этой задачи для всех мегаполисов мира, большие успехи в области прикладной математики и вычислительной техники, задача оптимального управления трафиком в сети городских дорог произвольной топологии не решена. Основной причиной нерешенности данной задачи является высокая сложность ее формальной, математической постановки.

Открывает выпуск статья М. В. Яшиной и А. Г. Таташева «Памяти А. П. Буслаева — друга, ученого и основателя научной школы математического моделирования транспортных потоков». Авторы, работавшие в его научной группе с начала зарождения тематики по моделированию транспортных процессов, делятся своими воспоминаниями об этом удивительном и цельном ученом, который за свою недолгую жизнь сумел создать новое научное направление, которому посвящена проведенная в Математическом центре Сириуса конференция, собрать активный научный коллектив, создал условия для пополнения этого коллектива благодаря открытию подготовки математиков в МАДИ, подарил плодотворные математические идеи, дал вдохновляющие примеры научного творчества.

Далее будет кратко описано содержание настоящего специального выпуска (статьи ранжировались в алфавитном порядке по фамилиям первых авторов).

В статье «О периодических режимах движения тела по горизонтальной шероховатой плоскости, реализуемых посредством перемещения двух внутренних масс» (Б. С. Бардин, А. А. Рачков, Е. А. Чекина, А. М. Чекин) рассматривается механическая система, состоящая из твердого тела и двух подвижных внутренних масс. Задача имеет важное значение для анализа устойчивости движения наземных транспортных средств по поверхности, обладающей свойствами, близкими к дорожному покрытию. Постановка задачи точно формализована в рамках канонической теоретической механики. Внутренние массы системы перемещаются в вертикальной плоскости по взаимно перпендикулярным направляющим и по гармоническому закону. Между телом и плоскостью действует сила сухого кулоновского трения. Для данной механической системы была проведена подробная классификация всех возможных периодических режимов движения и в трехмерном пространстве параметров задачи построены области их существования.

В статье «Идентификация парадокса Браесса в модели стабильной динамики» (Ю. В. Дорн, О. М. Шитиков) проведено исследование парадокса Браесса в модели стабильной динамики. В частности, были получены новые свойства равновесия, на базе которых предложен алгоритм поиска неэффективных ребер как в случае одной пары «источник–сток», так и в случае нескольких пар «источник–сток». Исследование условий единственности равновесия позволило определить область применимости предложенного алгоритма. В статье также приводится результат численного эксперимента поиска неэффективных ребер в транспортной сети города Анахайма.

В статье «Модификации алгоритма Frank – Wolfe в задаче поиска равновесного распределения транспортных потоков» (И. Н. Игнашин, Д. В. Яρμοшик) сделан обзор модификаций алгоритма Frank – Wolfe, применяемых для поиска равновесия в модели Бекмана. Предложены новые модификации: N-conjugate Frank – Wolfe и Weighted Fukushima Frank – Wolfe. Проведены численные эксперименты на различных транспортных сетях, имеющихся в открытом доступе; выявлено преимущество алгоритма N-conjugate Frank – Wolfe в скорости сходимости.

В статье «Фреймворк sumo-atclib для моделирования адаптивного управления трафиком дорожной сети» (В. И. Казорин, Я. А. Холодов) предлагается фреймворк Sumo-Atclib, который предоставляет удобный интерфейс для апробации разных алгоритмов адаптивного управления и использует среду микроскопического моделирования транспорта с открытым исходным кодом SUMO. Фреймворк разделяет функционал контроллеров и систем наблюдения и детектирования.

Он повторяет архитектуру реальных светофорных объектов и систем адаптивного управления и таким образом упрощает апробацию новых алгоритмов.

В статье «Модель динамической ловушки для описания человеческого контроля в рамках «стимул – реакция»» (И. А. Лубашевский, В. И. Лубашевский) предлагается новая модель динамической ловушки типа «стимул – реакция» системы «автомобиль – водитель – дорога», которая имитирует управление человеком динамической системы при ограниченности рациональности человеческого сознания. Детально рассматривается сценарий, в котором субъект модулирует контролируемую переменную в ответ на определенный стимул. Динамика системы представляется как чередующаяся последовательность пассивного и активного режимов управления с вероятностными переходами между ними. В общем случае пассивный и активный режимы базируются на различных механизмах, что является проблемой для создания эффективных алгоритмов их численного моделирования. Предлагаемая модель преодолевает эту проблему за счет введения динамической ловушки типа «стимул – реакция», имеющей сложную структуру. Область динамической ловушки включает две подобласти: область стагнации динамики системы и область гистерезиса. Модель основывается на формализме стохастических дифференциальных уравнений и описывает как вероятностные переходы между пассивным и активным режимами управления, так и внутреннюю динамику этих режимов в рамках единого представления. Предложенная модель воспроизводит ожидаемые свойства этих режимов управления, вероятностные переходы между ними и гистерезис вблизи порога восприятия.

В статье И. В. Подлипновой, Ю. В. Дорна, И. А. Склонина «Облачная интерпретация энтропийной модели расчета матрицы корреспонденций» рассматриваются идеи построения согласованных оптимизационных моделей для обобщенных расчетов матрицы корреспонденций, которые учитывали бы наличие различных слоев спроса, типов агентов и транспорта в сети. В частности, авторы предлагают подход к построению таких моделей, подменяющий многостадийную схему и допускающий интерпретацию основных блоков с единой позиции. Авторы приводят концептуальную схему моделирования и иллюстрируют ее применение на частной задаче.

В статье С. М. Пучинина, Е. Р. Королькова, Ф. С. Стонякина, М. С. Алкуса и А. А. Выгузова «Субградиентные методы с шагом типа Б. Т. Поляка для задач минимизации квазивыпуклых функций с ограничениями-неравенствами и аналогами острого минимума» предложены варианты шага Б. Т. Поляка для субградиентных методов с переключениями по продуктивным и непродуктивным шагам для задач минимизации квазивыпуклой целевой функции со слабовыпуклыми ограничениями-неравенствами, доказаны результаты о сходимости такого типа методов. Авторы получили условия, при которых использование методов неточного значения минимума не ухудшает существенно гарантии сходимости метода. Предложенные в статье подходы могут быть применены к задачам негладкой оптимизации с ограничениями-неравенствами, которые возникают во многих приложениях (максимизация полезности сети, проектирование механических конструкций, геометрические задачи, слабовыпуклые задачи восстановления фазы, задачи восстановления малоранговых матриц и др.).

В статье «Численно-аналитическое исследование движения маятника Максвелла» (Г. М. Розенблат, М. В. Яшина) рассматривается задача об устойчивости вертикального положения маятника Максвелла при его периодических движениях вверх-вниз. Для обеспечения безопасности транспортных потоков важным вопросом является анализ устойчивости динамики отдельного наземного транспортного средства в различных ситуациях. Теоретическая модель маятника Максвелла используется для анализа вибраций компонентов транспортных средств и запускных систем, а именно, позволяет определить точки резонанса и предотвратить разрушение конструкций под воздействием динамических нагрузок. Рассмотрены два типа переходных движений: остановка — происходит тогда, когда тело маятника в своем самом верхнем положе-

нии на нити (при его стандартном движении вверх) на мгновение останавливается; двухзвенный маятник — происходит тогда, когда вся нить с тела маятника выбрана, что соответствует самому нижнему положению тела на нити при его стандартном движении вниз. Во втором случае тело вынуждено вращаться относительно нити вокруг точки ее закрепления к телу. Показано, что при любых значениях параметров маятника это положение является неустойчивым в том смысле, что в системе возникают колебания нити около вертикали конечной амплитуды при сколь угодно малых начальных отклонениях. Кроме того, установлено, что никаких ударных явлений при движении маятника Максвелла не возникает, а сама модель этого маятника при часто используемых в литературе значениях его параметров является некорректной по Адамару. В настоящей работе показано, что вертикальное положение нитей маятника при указанных колебательных движениях тела вдоль нитей при любых невырожденных значениях параметров маятника Максвелла всегда является неустойчивым в указанном выше смысле.

В статье «Повышение качества генерации маршрутов в SUMO на основе данных с детекторов с использованием обучения с подкреплением» (И. А. Саленек, Я. А. Селиверстов, С. А. Селиверстов, Е. А. Софронова) предлагается новый подход к построению высокоточных маршрутов на основе данных от транспортных детекторов в пакете моделирования трафика SUMO. Существующие инструменты, такие как Flowrouter и RouteSampler, имеют ряд недостатков, например отсутствие взаимодействия с сетью в процессе построения маршрутов. Предлагаемый в статье RIRouter использует мультиагентное обучение с подкреплением (MARL), где агенты — входящие полосы движения, а окружающая среда — дорожная сеть. Поскольку RIRouter обучается внутри симуляции SUMO, он может лучше строить маршруты, принимая во внимание взаимодействие транспортных средств как друг с другом, так и с сетевой инфраструктурой.

В статье «Использование реальных данных из нескольких источников для оптимизации транспортных потоков в пакете CTraf» (Е. А. Софронова, А. И. Дивеев, Д. Э. Казарян, С. В. Константинов, А. Н. Дарьина, Я. А. Силиверстов, Л. А. Баскин) рассмотрена задача оптимального управления транспортным потоком в сети городских дорог. Управление осуществляется изменением длительностей рабочих фаз светофоров на регулируемых перекрестках. Приведено подробное описание разработанной системы управления. Для определения моментов переключения рабочих фаз светофоров количественные характеристики транспортных потоков поступают в математическую модель. Модель представляет собой систему конечно-разностных рекуррентных уравнений и описывает изменение транспортного потока на каждом участке дороги в каждый такт времени на основе рассчитанных данных по характеристикам транспортного потока в сети, пропускным способностям дорог и распределению потока на перекрестках. Модель обладает свойствами масштабирования и агрегирования.

В статье «Программный комплекс для численного моделирования движения систем многих тел» (Е. А. Сухов, Е. А. Чекина) решается задача численного моделирования движения механических систем, состоящих из твердых тел с произвольными массово-инерционными характеристиками. Предполагается, что рассматриваемые системы являются пространственными и могут содержать замкнутые кинематические цепи. Движение системы происходит под действием внешних и внутренних сил достаточно произвольного вида. Для вывода дифференциально-алгебраических уравнений движения используется так называемый метод шарнирных координат. Отличительной чертой данного метода является сравнительно небольшое количество получаемых уравнений движения, что позволяет повысить производительность вычислений. Алгоритмы реализованы в виде программного комплекса, содержащего систему символьной математики, библиотеку графов, механический решатель, библиотеку численных методов и пользовательский интерфейс, что придает статье практическую значимость.

В статье «Моделирование транспортных потоков на основе квазигазодинамического подхода и теории клеточных автоматов с использованием суперкомпьютеров» (В. Ф. Тишкин,

М. А. Трапезникова, А. А. Чечина, Н. Г. Чурбанова) приведены современные методы моделирования динамики автотранспортных потоков на транспортных сетях мегаполисов и систематизация современного состояния дел в этой области. Основным ядром современных интеллектуальных транспортных систем являются адекватные математические модели, максимально приближенные к реальности. Отмечается, что в связи с большим объемом вычислений необходимо использование суперкомпьютеров, следовательно, создание специальных параллельных алгоритмов. Основное внимание уделяется созданным авторами статьи разработкам в областях как макроскопического, так и микроскопического моделирования. Макроскопическая модель основана на приближении сплошной среды и использует идеологию квазигазодинамических систем уравнений. Представлены тестовые расчеты движения по дороге с локальным расширением и по дороге с системой светофоров с различными светофорными режимами, которые позволили сделать выводы о влиянии расширения на пропускную способность дороги в целом и выбрать оптимальный режим для получения эффекта «зеленой волны». Микроскопическая модель основана на теории клеточных автоматов и однополосной модели Нагеля – Шрекенберга и обобщена авторами на случай многополосного движения. В модели реализованы различные поведенческие стратегии водителей, реализованы специальные алгоритмы, адаптированные для параллельных вычислений. Тестовые расчеты выполнены на суперкомпьютере К-100 ЦКП ИПМ им. М. В. Келдыша РАН.

В статье «Модели пространственной селекции при диаграммообразовании на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона» (Г. А. Фокин, Д. Б. Волгушев) представлена оригинальная авторская технология позиционирования движущегося транспортного средства, которая имеет высокую актуальность при разработке систем мониторинга характеристик транспортных потоков. Авторами решается задача установления зависимости потенциала пространственной селекции полезных и мешающих сигналов по критерию отношения «сигнал/помеха» от погрешности позиционирования устройств при диаграммообразовании по местоположению на базовой станции, оборудованной антенной решеткой. Конфигурируемые параметры моделирования включают планарную антенную решетку с различным числом антенных элементов, траекторию движения, а также точность определения местоположения по метрике среднеквадратического отклонения оценки координат устройств. Адаптивное диаграммообразование реализуется по обучающему сигналу и обеспечивает оптимальную пространственную селекцию полезных и мешающих сигналов без использования данных о местоположении, однако отличается высокой сложностью аппаратной реализации. Скрипты разработанных моделей доступны для верификации. Полученные результаты могут использоваться при разработке научно обоснованных рекомендаций по управлению лучом в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона пятого и последующих поколений.

В статье М. В. Яшиной, А. Г. Таташева «Двухконтурная система с различными по длине кластерами и неодинаковым расположением двух узлов на контурах» исследованы свойства динамической системы класса сетей Буслаева, которая является моделью транспортной развязки с двумя контурами и двумя конфликтными точками. Исследуется эргодичность системы в зависимости от топологии, ориентации и режимов движения. Зависимость качественных свойств динамической системы от режима движения частиц является фундаментальной особенностью потоков на сетях Буслаева как моделей транспорта. В предыдущих работах авторов доказано, что двухконтурная система с симметричной топологией в общем случае не является эргодической и описаны все сценарии поведения системы в зависимости от топологических и динамических параметров. В несимметричной постановке система имеет произвольную топологию с вариацией режимов движения. Несимметричность системы состоит в том, что загрузка неодинакова для контуров, а узлы делят контуры в неодинаковом отношении. Выявлено, что состояния системы, принадлежащие некоторому зависящему от начального состояния множеству, периодически

повторяются, т. е. реализуются замкнутые траектории в пространстве состояний системы — предельные циклы, которым соответствует пара значений средних скоростей движения с учетом задержек. Множество таких пар при различных начальных состояниях системы представляет собой спектр скоростей, поиск которого представляет важнейшую задачу. В статье получен новый метод анализа спектра системы на основе построения диаграммы предельных циклов.

*Редакторы выпуска:*

*А. В. Гасников*

*А. И. Лобанов*

*Я. А. Холодов*

*А. В. Щуплев*

*М. В. Яшина*