

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.099-109

УДК 004.942

АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РАЗРАБОТКИ ГИБРИДНЫХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ¹

Статья поступила в редакцию 03.10.2019, в окончательной варианте – 23.11.2019.

Курочкин Леонид Михайлович, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, кандидат технических наук, e-mail: kurochkinl@gmail.com

Чернышев Александр Сергеевич, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, 194021, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26, научный сотрудник, e-mail: alexander.tchernyshev@mail.ioffe.ru

Курочкин Михаил Александрович, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, кандидат технических наук, доцент, e-mail: kurochkin.m@gmail.com

Чуватов Михаил Владимирович, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ведущий программист, e-mail: irongate@yandex.ru

Необходимость повышения безопасности дорожного движения, обеспечения мониторинга движения транспорта, управления его маршрутизацией требует оперативного развития интеллектуальных транспортных сетей. Основным средством, используемым при проектировании интеллектуальных транспортных сетей, является компьютерное моделирование. Существующие модели транспортных систем часто предполагают поиск компромисса между точностью результатов моделирования и временем проведения вычислительных экспериментов с моделями – из-за использования представления транспортной системы только на микро- или макроуровне. Гибридные решения моделей транспортных сетей, позволяющие производить моделирование транспортных потоков на микро- и макроуровнях, а также осуществлять оперативный переход между ними в существующей литературе, не представлены. В настоящей работе приведено обоснование целесообразности разработки гибридной модели; предложен подход, обеспечивающий переход между микро- и макроуровнями моделей транспортных сетей. Предложенное решение реализовано с использованием макроскопического симулятора транспортных сетей SUMO и оригинальной континуальной модели транспортных потоков. Разработанный подход позволяет значительно сократить время моделирования транспортных потоков в крупных городах без ущерба для точности (адекватности) получаемых результатов.

Ключевые слова: гибридная модель транспортной сети, континуальная модель транспортного потока, микро- и макромоделей транспортных сетей, критерии перехода между микро- и макромоделями, SUMO, интеллектуальные транспортные системы

ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF HYBRID MODELS OF TRANSPORT SYSTEMS

The article was received by the editorial board on 03.10.2019, in the final version – 23.11.2019.

Kurochkin Leonid M., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politeknicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation, Ph.D., e-mail: kurochkinl@gmail.com

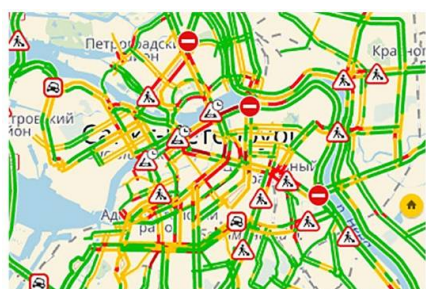
Chernyshev Alexander S., Institute of Physics and Technology named after A.F. Ioffe, 26 Politeknicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation, Researcher, e-mail: alexander.tchernyshev@mail.ioffe.ru

Kurochkin Mikhail A., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politeknicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kurochkin.m@gmail.com

Chuvatov Mikhail V., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politeknicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation, Leading Programmer, e-mail: irongate@yandex.ru

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-07-00430. This work was supported by the RFBR grant No. 18-07-00430.

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Построение гибридных моделей транспортных сетей регионов
Building hybrid models of regional transport networks



Разработка и исследование критериев перехода между микро и макро уровнями моделей транспортных сетей

Development and research of transition criteria between micro and macro levels of transport network models



The need to improve road safety, ensure monitoring of transport, manage its routing requires the rapid development of intelligent transport networks. The main tool used in the design of intelligent transport networks is computer simulation. Existing transport system models often offer a compromise between modeling accuracy and model runtime due to the use of the transport system representation only at the micro or macro level. At the moment, hybrid solutions of transport network models that allow modeling of traffic flows at the micro and macro levels and carry out an operational transition between them are not presented. In this paper, the rationale for the development of a hybrid model is justified, an approach is proposed that provides a transition between micro and macro levels of transport network models. The proposed solution is implemented using the SUMO macroscopic transport network simulator and the original continuum model of traffic flows. The developed approach can significantly reduce the modeling time of traffic flows of large cities without compromising accuracy.

Key words: transport network hybrid model, a continuous model of a traffic stream, micro and macro models of transport networks, transition criteria between micro and macro models, SUMO, Intelligent Transport Systems

Введение. Темпы роста количества используемых автомобилей в большинстве регионов России значительно опережают скорость строительства дорожных сетей, развития дорожной инфраструктуры. Это негативно сказывается на безопасности дорожного движения; приводит к образованию многокилометровых заторов; ухудшает состояние окружающей среды за счет выбросов в воздух от автомобильного транспорта, в том числе стоящего в заторах с работающими двигателями.

В последние годы особый интерес на государственном уровне вызывает создание и использование интеллектуальных транспортных сетей (ИТС) [6]. Ключевыми целями их использования являются следующие: повышение безопасности дорожного движения; предоставление водителям и пассажирам автомобилей доступа к сетевым информационным сервисам [9]; осуществление оперативного мониторинга и контроля дорожно-транспортной обстановки в городах и регионах.

Основным средством коммуникации, используемым в ИТС, являются глобальные и локальные беспроводные сети передачи данных. Каждый участник ИТС (автомобиль, элемент инфраструктуры ИТС) может выступать в роли приёмника (получателя), передатчика и ретранслятора данных. Мобильность абонентов телекоммуникационных сетей ИТС усложняет маршрутизацию данных – это особенно важно для локальных (mesh) сетей; снижает точность прогнозирования загрузки отдельных фрагментов глобальных сетей, что затрудняет обеспечение постоянного надёжного доступа к сервисам ИТС.

Основным средством, используемым при проектировании ИТС, является компьютерное моделирование. При этом особый интерес представляет исследование зависимостей свойств дорожного и сетевого трафиков от различных параметров. Указанные исследования необходимы для

построения адаптивных предсказательных моделей, позволяющих оперативно оценить загрузку транспортных и сетей передачи данных, провести планирование надёжной передачи данных в ИТС с учётом её динамики.

Целью данной работы является обоснование целесообразности разработки и использования гибридных моделей транспортных систем, реализующих моделирование на микро- и макроуровнях.

Основные подходы к построению моделей транспортных сетей. Существует два основных подхода к моделированию дорожного трафика, которые основаны на использовании микроскопических и макроскопических моделей. Микроскопические модели описывают индивидуальное поведение каждого участника дорожного движения с использованием значительного набора параметров, включая время реакции водителя на изменение дорожной обстановки, зависимости ускорений автомобилей от параметров движения соседних транспортных средств, движущихся в том же направлении, и др. [14, 15]. Такие модели являются наиболее детализированными, однако они наиболее требовательны к вычислительным ресурсам [16]. Таким образом, для задач, в которых время моделирования является критическим параметром, локальные модели не всегда могут быть применимы. Альтернативой могут служить континуальные модели дорожного трафика – макроскопические модели.

При построении таких моделей используется аналогия с движением жидкости и газа в рамках приближения «сплошной среды», когда от свойств отдельных молекул переходят к локальным параметрам среды. Для перехода используется процедура усреднения по контрольному объёму. При этом объём выбирается достаточно большим для попадания в него большого числа молекул, однако существенно меньшим по линейным размерам по сравнению с областью моделирования [5]. В случае с дорожными сетями можно утверждать, что континуальный подход применим на протяженных участках дорог с высокой плотностью дорожного трафика. При таких конфигурациях и условиях дорожной сети локальные модели дорожного трафика оказываются требовательными к вычислительным ресурсам.

Одни из первых континуальных математических моделей дорожного трафика использовали только уравнение баланса массы [12]. Особенностью таких моделей было предсказание нефизических скачков уплотнения трафика, которые могли приводить к заторам. Для устранения этого недостатка исходные уравнения были переформулированы в виде уравнения сохранения импульса с добавочными «источниковыми» слагаемыми, учитывающими влияние градиента давления и релаксацию поля скорости к некоторому равновесному значению [10, 11]. Выражение для давления описывает взаимное влияние соседних машин и отражает поведение водителя в плотном и разреженных автомобильных потоках, причём с ростом плотности давление также растёт.

Разработка гибридных моделей дорожного трафика, сочетающих свойства микроскопических и макроскопических моделей, позволит избежать постоянного расчёта индивидуальных характеристик всех участников ИТС. Использование гибридных моделей дорожного трафика позволит понизить требования к необходимым вычислительным мощностям, что даст более широкие возможности реализации моделей транспортных сетей городов и агломераций, необходимых для исследования зависимостей дорожного и сетевого трафиков.

Реализация моделей транспортных потоков. Существует множество подходов к построению моделей транспортных сетей. Активно используются энтропийные, гравитационные, гидрогазодинамические, стохастические модели, модели следования за лидером и др. Для построения моделей применяется обширный «инструментарий»: методы теории массового обслуживания, теория клеточных автоматов, теория графов и др. Активно развиваются программные симуляторы, позволяющие проводить имитационное моделирование транспортных сетей. Несмотря на это, универсальных средств моделирования транспортных потоков, позволяющих проводить исследования зависимостей транспортного и сетевого трафиков для моделей городов и агломераций, в литературе не представлено.

Внимание исследователей транспортных потоков привлекает уточнение микроскопических моделей. В работе [7] предложено использование разделения крупных городов на транспортные районы. Данное решение использует матрицы корреспонденций с применением гравитационной модели [1]. Последняя связывает интенсивность потока T_{ij} между общим количеством отправления из i -го района Q_i и прибытием в j -й район D_j и затраты на передвижение между районами i и j c_{ij} , а также цепей корреспонденций. Использование вышеуказанных структур данных позволяет повысить точность (адекватность) моделирования транспортных потоков города.

Отдельным направлением развития моделей транспортных сетей является разработка и исследование перколяционных стохастических моделей [4]. На основе использования этих моделей становится возможным описать зависимость вероятности блокирования отдельных узлов в зави-

симости от характеристик дорожного движения с течением времени. Указанные модели позволяют описывать правила обслуживания перекрестков, материальный баланс числа машин в системе и связи их потоков между соседними перекрестками.

Также для решения задач моделирования автомобильных потоков разрабатываются специализированные солверы, учитывающие специфику автомобильного трафика, индивидуальные свойства варьирования скоростей и дистанций между автомобилями, характерные для различных типов автомобильных потоков. В работе [3] предложен солвер, использующий для моделирования автомобильных потоков кратные шаги. Размер макрошага в указанной работе принимался равным среднему значению времени реакции водителя. Размер микрошага определялся по результатам оценки локальной ошибки вычисления скоростей, используемой схемы численного интегрирования. Солвер, представленный в [2], использует оригинальные схемы численного интегрирования с кратными шагами по времени, обеспечивающими индивидуальный выбор микрошагов для каждого макрошага вычислений. Использование предложенного метода позволяет значительно сократить время моделирования по сравнению с односторонним методом и получить оценку локальной ошибки не только для скоростей, но и для дистанций между автомобилями.

В представленной работе для описания транспортных потоков на макроуровне была выбрана гидродинамическая модель дорожного трафика. Выбор такого подхода обусловлен тем, что гидродинамические модели хорошо изучены и движения транспортных потоков во многом аналогичны движению сжимаемых сред по трубам. Гидродинамические модели хорошо масштабируются и позволяют описывать транспортные системы на разных уровнях, от района города до региона. Также, при необходимости расчета отдельных элементов дорожной сети на микроуровне, переход между моделями легко осуществим при помощи процедур усреднения и интерполяции данных.

SUMO – симулятор микроуровня для модернизации. Одним из популярных микроскопических симуляторов транспортных сетей является SUMO (Simulation of Urban MObility), разрабатываемый в Институте исследования транспорта (Institute of Transportation Systems, Германия). Данное решение реализует микроскопическую непрерывную модель дорожного трафика.

Название симулятора дословно: симуляция городской мобильности. Это фреймворк с открытым исходным кодом для моделирования транспортных потоков дорожных сетей. Так, SUMO реализует моделирование на микроскопическом уровне, обеспечивая индивидуальное описание свойств каждого участника дорожного движения. Модель SUMO позволяет учитывать взаимное влияние участников дорожного движения, реализуя безаварийную модель движения. Модели SUMO позволяют детально описывать свойства дорожных сетей и участников дорожного движения, включая смены ими полос дорожного движения, реализации управления светофорами, а также моделей пешеходов, оказывающих влияние на поведение транспортных средств.

Симулятор SUMO используется для проведения исследований различных тем, например, при разработке методов маршрутизации транспортных средств; алгоритмов работы светофоров; для разработки методов беспроводной маршрутизации данных для реализаций ИТС; а также при разработке и анализе стратегий движения беспилотных транспортных средств.

К ключевым особенностям SUMO можно отнести следующее:

1. Возможность реализации моделирования непрерывного движения участника движения в пространстве и времени.

2. Возможности реализации следующего:

- моделей различных типов транспортных средств, каждое из которых может двигаться по индивидуальному маршруту;
- многополосных дорог, на которых транспортные средства сами выбирают полосу для движения и момент для смены полосы;
- различных правил проезда перекрестков, в том числе регулируемых светофорами;
- значительных по размерам дорожных сетей (десятки тысяч улиц).

3. Интеграция с другими программными приложениями для импорта/экспорта данных, например, VISUM (<http://vision-traffic.ptvgroup.com>), Vissim (<http://www.vissim.com>), OSM (<https://www.openstreetmap.org>), RoboCup (<https://www.robocup.org>) и MATsim (<https://www.matsim.org>).

4. Кроссплатформенная реализация.

Микроскопическая непрерывная модель дорожного трафика индивидуально описывает свойства каждого «участника» модели. По этой причине при моделировании больших фрагментов дорожных сетей (города, агломерации) требуются значительные вычислительные ресурсы. Использование континуальной модели для описания фрагментов дорожных сетей городов и агломераций

позволит значительно сократить время моделирования, обеспечив возможность оперативного перехода между микроскопической и макроскопической (континуальной) моделью.

Математическая модель для макроуровня. За основу предложенной математической модели взяты наработки в области движения многофазных потоков и разработанного кода MFlow [8].

Система уравнений движения дорожного трафика в континуальном приближении эквивалентна системе уравнений Навье – Стокса для сжимаемой среды. Основу модели составляет уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

отражающее факт сохранения количества автомобилей на участке дороги. Плотность автомобильного потока имеет размерность количества автомобилей на 1 погонный метр дороги.

Для учета изменения скорости транспортного потока используется модифицированное уравнение сохранения импульса для сплошной среды:

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + V \frac{\partial(\rho V)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\rho}{\tau}(V_e - V). \quad (2)$$

Первое слагаемое в правой части (2), выражающее влияние градиента давления в гидродинамике, проистекает из аналогии с микромоделью следования за лидером. Это слагаемое отражает тот факт, что каждый водитель учитывает окружающую дорожную обстановку: ускоряется и замедляется в соответствии с поведением соседних транспортных средств, движущихся в том же направлении. При снижении скорости автомобильного потока локальное значение давления растет. Это приводит к росту градиента давления и стремлению транспортных средств покинуть участок с высокой плотностью машин.

Второе слагаемое в правой части (2) выражает стремление потока к достижению некоторой скорости V_e , являющейся оптимальной в определенных условиях. Скорость V_e есть равновесная скорость потока, реализуемая при равномерном и однородном режимах движения по дороге. Параметр τ является характерным временем релаксации потока на каждом участке дороги. Он, в общем случае, зависит от параметров потока и типа транспортного средства. Иными словами, особенности психологии поведения конкретных водителей в данной модели нивелируются.

Выражение для V_e имеет в общем случае следующий вид:

$$V_e = V_0 - \tau(\rho)(1 - p(\rho))P,$$

где V_0 – заданная скорость на участке дороги, соответствует максимально разрешенной скорости; величина $p(\rho)$ является вероятностью перестроения – показателем того, с какой вероятностью автомобили будут обгонять транспортное средство, движущееся в том же направлении медленнее локальной скорости потока. Этот параметр позволяет учитывать локальную неоднородность скорости каждого отдельно взятого транспортного средства в каждой точке дороги.

Численный метод, используемый при моделировании на основе макромоделей. Численный метод основан на методе конечных объемов и неструктурированных сетках [17]. Исходные уравнения модели записываются в интегральной форме относительно расчетных ячеек сетки. Объемные интегралы от дивергенции и градиента при помощи формулы Остроградского – Гаусса приводятся к поверхностным интегралам. Используя допущение о том, что значения искомых величин остаются постоянными на всей поверхности каждой грани ячейки, интегралы можно переписать в виде конечных сумм по всем граням ячейки. Используется схема, в которой все величины хранятся в центрах ячеек.

Левые части уравнений сохранения включают в себя нестационарное слагаемое, отвечающее за изменение величины по времени, и конвективное слагаемое, отражающее изменение по пространству. Аппроксимация нестационарного слагаемого реализована при помощи неявной схемы Эйлера [17]. Используемая схема проста в реализации и подходит для анализа стационарных и квазистационарных режимов движения.

Для дискретизации конвективного слагаемого используются противопоточные схемы второго порядка точности по пространству. Используемые схемы удовлетворяют критерию TVD [18], переключаясь на первый порядок точности в областях резких скачков решения и возвращаясь на второй порядок в областях гладких решений.

Расчет поля давления и скорости реализован при помощи алгоритма SIMPLE [13].

Блок-схема алгоритма решения уравнений представлена на рисунке 1. Программная реализация включает автономный построитель дорожной сети, покрывающей ее сетки, а также препроцессор и решатель. Все компоненты разработаны с использованием языка программирования C++, а также библиотеки OpenMP для обеспечения возможности распараллеливания вычислений на системах с общей памятью.

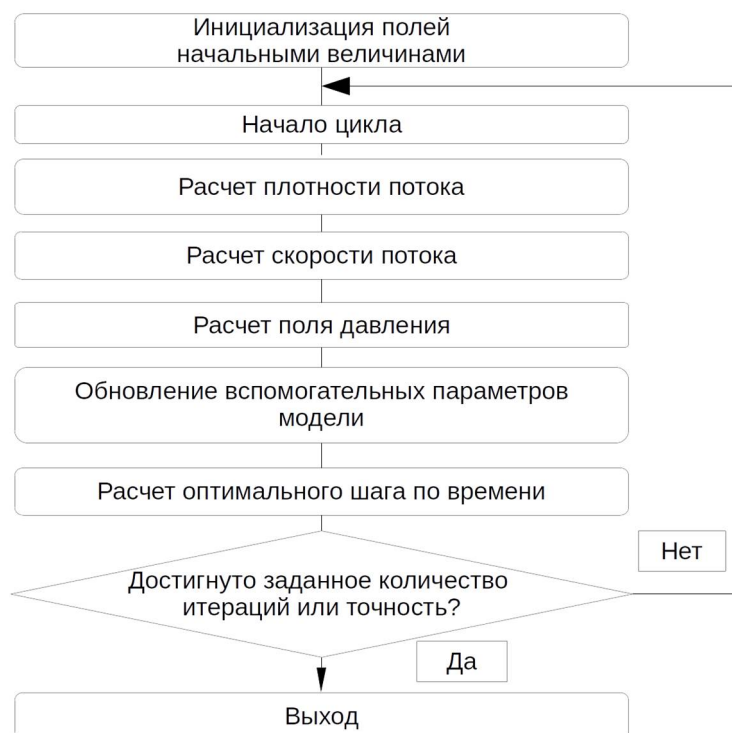


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма

Предпосылки для перехода между микро- и макроуровнями моделирования. В значительной части задач, связанных с разработкой и исследованием ИТС, отсутствует необходимость построения микроскопической модели каждого фрагмента дорожной сети. Интерес исследователей привлекают нештатные ситуации на дорожных сетях, например, такие, как выход из строя элементов коммуникационной компоненты ИТС на заданных участках дорожной сети для последующей оценки возможности и эффективности использования альтернативных средств передачи данных среди участников ИТС. В качестве альтернативных средств передачи данных могут использоваться одноранговые сети, «дублирующие» каналы передачи данных, вышедших из строя глобальных сетей передачи данных. Для проведения исследования нештатных ситуаций на фрагментах дорожных сетей достаточно описать изменения свойств потоков транспорта, прибывающих в исследуемую область и покидающих её. Для построения модели, отвечающей таким требованиям, в настоящей работе предложено использовать описанную выше континуальную модель. Дорожная сеть города или региона содержит значительное количество однотипных элементов: перекрёстки («крестовые» и Т-образные); примыкания дорог/съезды; прямые/изогнутые участки дорог и др. В настоящей работе предлагается описывать отдельные однотипные элементы дорожной сети с использованием континуальной модели и при необходимости переходить к микроскопическому описанию, реализованному в SUMO, обеспечив передачу параметров, характеризующих усреднённые свойства транспортных потоков, вычисленные в континуальной модели. Предлагаемый подход позволит значительно сократить время работы модели транспортной сети.

Постановка задачи вычислительного эксперимента. Для проведения вычислительного эксперимента были выбраны следующие типовые элементы дорожной сети: прямые отрезки длиной 500 и 5000 метров, Т-образный перекрёсток, на котором поток транспорта равномерно расходится в оба направления; съезд с дороги (перпендикулярный движению основного потока съезд направо), на котором с основной дороги съезжает 25 % автомобилей. На всех участках подразумевается однонаправленное движение транспорта, что не накладывает ограничений на построение модели с двусторонними дорогами, оставляя возможность проводить расчёт потока для каждого направления индивидуально. Модели указанных типовых элементов дорожной сети реализованы в SUMO и в предложенной континуальной модели. В процессе каждого вычислительного эксперимента фиксировалось реальное время выполнения моделирования для оценки целесообразности осуществления перехода между микро- и макроуровнями модели; оценивалась зависимость

времени работы модели от свойств потока транспорта на данном типовом элементе дорожной сети («плотность» машин).

При проведении эксперимента использовалась сборка SUMO версии 1.2.0. Модели однотипных фрагментов дорожных сетей последовательно реализовывались на компьютере, работающем под управлением операционной системы Debian GNU/Linux Buster 10. Компьютер был оснащён процессором Intel(R) Core(TM) i5-4210U CPU @ 1.70GHz (4 потока, 2 ядра), памятью 4GB. Для изоляции ядра процессора от планировщика операционной системы был добавлен параметр ядра linux: isolcpus = 2,3, что позволило отключить потоки 3 и 4, относящиеся ко 2-му ядру процессора от ПОТОКА управления. При запуске программы моделирования использовалось свободное второе ядро процессора, через команду taskset: taskset -c 2 python expN.py. Указанные настройки позволили исключить влияние исполнения фоновых процессов на время исполнения экспериментов.

В модели SUMO время симуляции запрашивалось через модуль output, фиксировались выходная переменная "Duration", содержащая (реальное) время, прошедшее с запуска процесса симуляции на основе времени, выдаваемого таймером операционной системы. Модельное время, используемое для SUMO, составляло 14400 секунд для всех экспериментов.

В модели MFlow [8] время выполнения рассчитывалось через внешнюю команду time, которая вычисляет, сколько времени процесс моделирования использовал процессор в пользовательском режиме.

Для получения сопоставимых начальных условий в исследуемых микро- и макромоделях было принято предположение, что на момент начала эксперимента весь фрагмент исследуемой дороги равномерно заполнен транспортом. Указанное предположение позволяет считать, что с начала процесса моделирования учитывается взаимное влияние транспортных средств в микромодели, что является «аналогией» трубы заполненной веществом в континуальной модели.

Характеристика результатов экспериментов. В первой серии экспериментов сравнивалось время выполнения вычислений для микро- и макромоделей, описывающих прямые участки дороги длиной 500 м (рис. 2) и 5000 м (рис. 3). Первый участок (500 м) соответствует среднему расстоянию между перекрёстками в современных городских новостройках, второе расстояние может соответствовать фрагменту шоссе. Результаты экспериментов и значительный разброс длин моделируемых участков позволяют отметить общую тенденцию в изменении времени вычислений для моделей. Дороги однопользовательные, микромодель описывает двухполосную дорогу. На рис. 2, 3 представлены зависимости времени выполнения моделирования от плотности потока автомобилей. По горизонтальной оси указан интервал в модельных шагах (интервал между шагами – 0,1 с модельного времени) SUMO появления нового автомобиля на дороге (1 автомобиль за 100 модельных шагов, за 40 шагов, и т.д.).

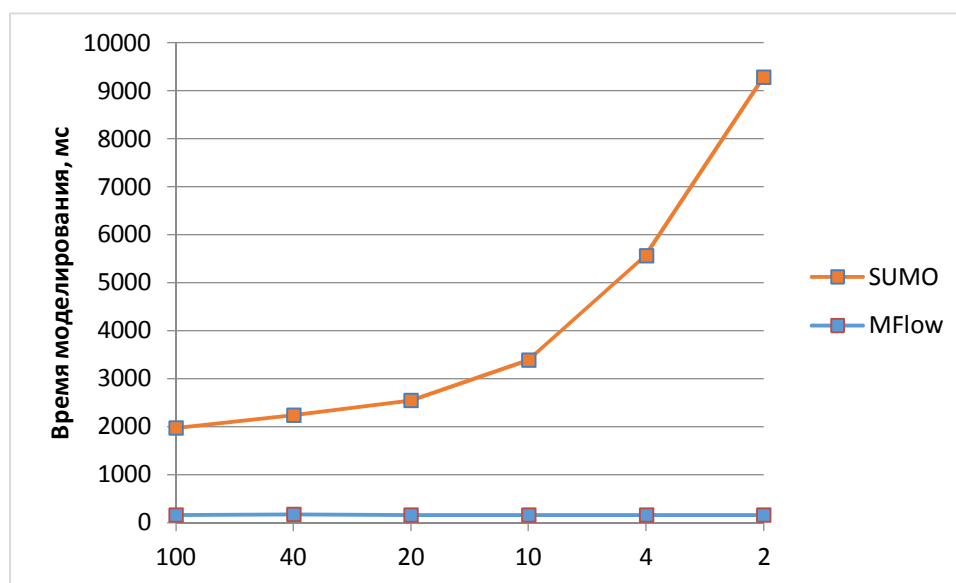


Рисунок 2 – Прямая двухполосная дорога длиной 500 м

Представленные на рисунке 2 зависимости показывают, что использование континуальной модели позволяет сократить время моделирования прямого участка двухполосной дороги от 10 раз (новый автомобиль появляется каждые 100 модельных шагов) до 30 раз (новый автомобиль появляется каждые два модельных шага).

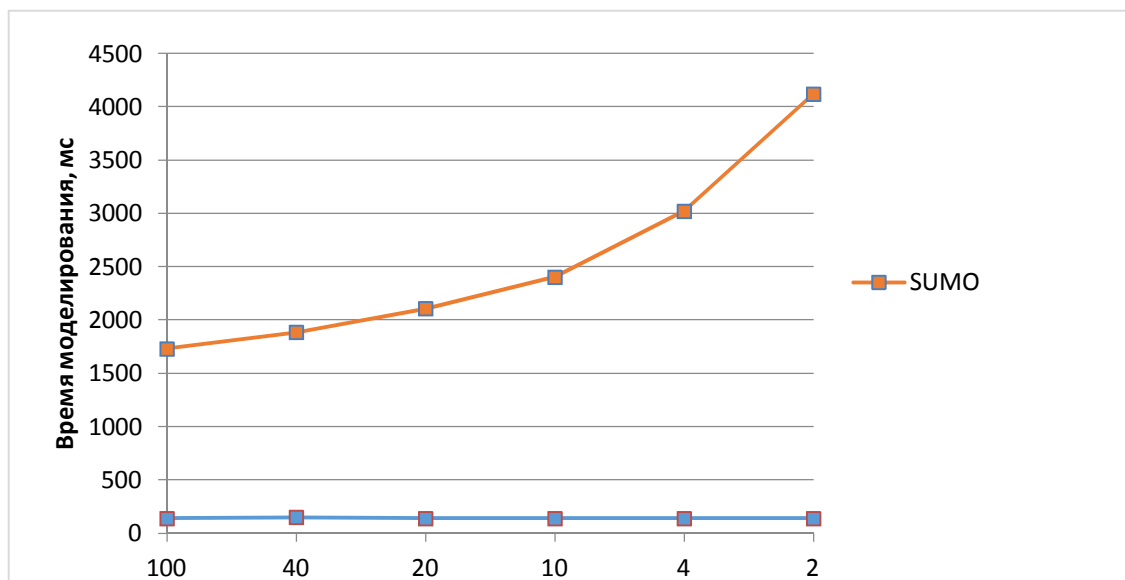


Рисунок 3 – Прямая двухполосная дорога длиной 5000 м

Аналогично, для длины участка 5000 м, как следует из рисунка 3, использование континуальной модели позволяет сократить время моделирования прямого участка двухполосной дороги от 12 раз (новый автомобиль появляется каждые 100 модельных шагов) до 57 раз (новый автомобиль появляется каждые 2 модельных шага).

Представленные зависимости показывают значительный рост времени исполнения программы для микромоделей при увеличении интенсивности появления на дороге автомобилей от 1 шт. за 100 модельных шагов до 1 шт. за 2 модельных шага и практически константное значение для континуальной модели.

Во второй серии экспериментов изучаются такие же, как и для предыдущих экспериментов зависимости для Т-образных перекрестков. На рисунке 5 представлены результаты эксперимента для Т-образного перекрестка, на котором односторонний поток транспорта въезжает на перекресток по одной дороге и выезжает с перекрестка по двум оставшимся (поток «упирается» в прямоугольное разветвление и расходится вправо и влево на рисунке 4а) таким образом, что делится на перекрестке пополам.

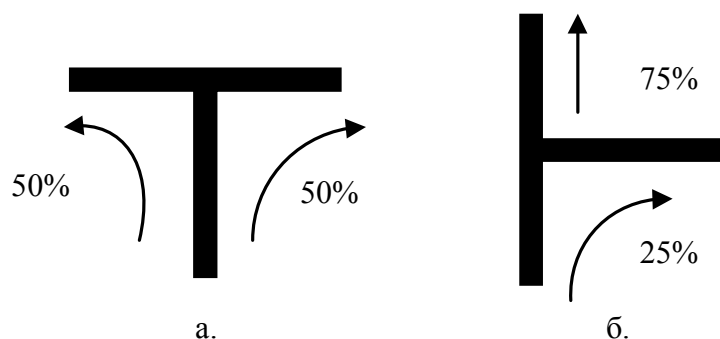


Рисунок 4 – Схемы движения транспорта на перекрестке

В указанном эксперименте длины каждого ответвления перекрестка приняты за 100 м.

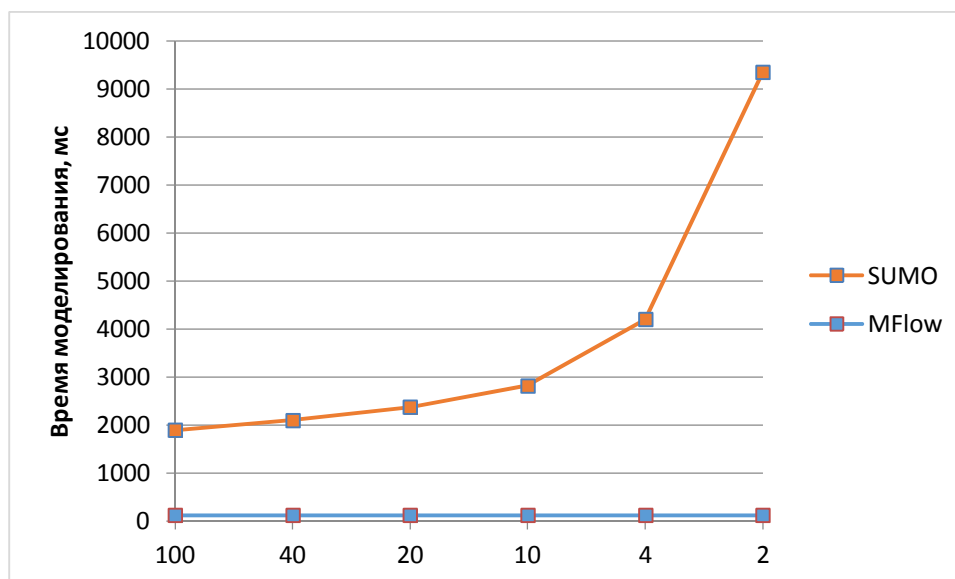


Рисунок 5 – Т-образный Перекресток

Представленные на рисунке 5 зависимости показывают, что использование континуальной модели позволяет сократить время моделирования движения транспорта на Т-образном перекрёстке однополосных дорог от 15 раз (новый автомобиль появляется каждые 100 модельных шагов) до 77 раз (новый автомобиль появляется каждые 2 модельных шага).

На рисунке 6 представлены результаты эксперимента для Т-образного перекрёстка, описывающего съезд с дороги направо, расположенный под прямым углом к направлению основного потока однопольного движения. В указанный съезд попадает 25 % транспорта (рис. 4б). В этом эксперименте длины каждого ответвления перекрёстка были приняты за 100 м.

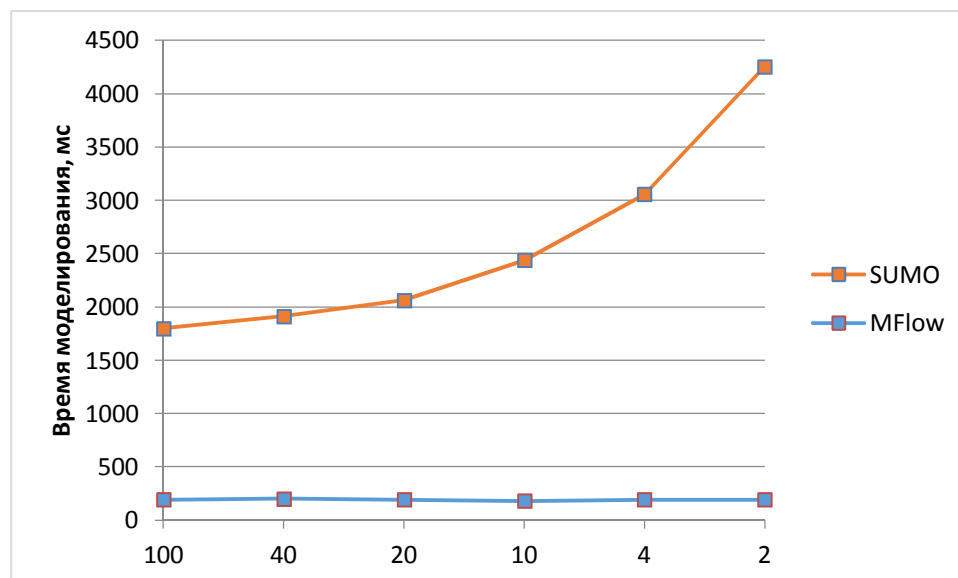


Рисунок 6 – Съезд с дороги направо

Представленные на рисунке 6 зависимости показывают, что использование континуальной модели позволяет сократить время моделирования Т-образного перекрёстка однополосных дорог от 9 раз (новый автомобиль появляется каждые 100 модельных шагов) до 22 раз (новый автомобиль появляется каждые 2 модельных шага).

Заключение. В работе представлено сопоставление времен выполнения программы моделирования для симулятора SUMO, в котором реализована микроскопическая модель дорожного трафика, и кода MFlow, оперирующего континуальной моделью.

Континуальная модель позволяет сократить время выполнения моделирования отдельных фрагментов дорожной сети на порядок и более, что подтверждено представленными результатами вычислительных экспериментов. Ключевой особенностью использования оригинальной континуальной модели является близкое к константному время её исполнения для разных пространственных размеров объектов. Указанная особенность объясняется тем, что в предложенном решении используется фиксированный набор ячеек сетки, применяемой для выполнения расчёта усреднённых характеристик потока, и полностью отсутствует индивидуальное описание каждого участника дорожного движения.

На основе полученных данных можно сделать вывод о рациональности и перспективности разработки гибридной модели дорожного трафика. Сокращение времени выполнения моделирования в рамках гибридной модели обеспечивается за счёт передачи из микромоделей усреднённых значений параметров транспортных потоков на входы типовых фрагментов дорожных сетей (прямые участки, перекрёстки и др.) в макромоделю. После чего производится вычисление усреднённых значений транспортных потоков на выходе типовых фрагментов при помощи макромоделей, а также дальнейшее использование полученных значений для передачи их в микромоделю или для дальнейшего расчёта движения транспорта на типовых фрагментах в континуальной модели.

Библиографический список

1. Гасников А. В. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский. – Москва : МФТИ, 2010. – 362 с.
2. Курц В. В. Солвер с кратными шагами, обеспечивающий контроль точности по скорости и дистанции / В. В. Курц, И. Е. Ануфриев // Математическое моделирование. – 2018. – Т. 30, № 9 – С. 87–99.
3. Курц В. В. Быстрый алгоритм с кратными шагами для задачи моделирования транспортных потоков / В. В. Курц, И. Е. Ануфриев // Математическое моделирование. – 2016. – Т. 28, № 5. – С. 124–134.
4. Лесько С. А. Разработка математического и программного обеспечения для моделирования и управления транспортными потоками на основе перколяционной стохастической модели / С. А. Лесько, А. С. Алёшкин, А. А. Барков // Конвергентные когнитивные информационные технологии : материалы II Международной научной конференции (Convergent 2017, Москва, Россия, 24–26 ноября 2017 г.). – Москва, 2017. – С. 454–469.
5. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Дрофа, 2006. – 395 с.
6. Об Основных направлениях и этапах реализации скоординированной (согласованной) транспортной политики государств – членов Евразийского экономического союза. Решение Высшего Евразийского экономического совета от 26 декабря 2016 года № 19. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456056120>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 05.07.2019).
7. Майоров Е. Р. Разработка микроскопической модели транспортных потоков города в системе SUMO / Е. Р. Майоров, И. Р. Лудан, Д. Д. Мотта, О. Н. Сапрыкин // Информационные технологии и нанотехнологии : материалы V Международной конференции и молодёжной школы (ИТНТ-2019). – 2019. – С. 743–747.
8. Чернышев А. С. Использование эйлерово-эйлеровского подхода для моделирования турбулентных течений пузырьковых сред / А. С. Чернышев, А. А. Шмидт // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39, вып. 12. – С. 17–24.
9. Chuvatov M. The Technology of Management of Data About Wireless Networks for Vehicle's Telematics Map / M. Chuvatov, V. Glazunov, L. Kurochkin, S. Popov // Proceedings of the International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems. – 2016. – Vol. 1. – P. 138–143.
10. Helbing D. Micro- and Macro- Simulation of Freeway Traffic / D. Helbing, A. Hennecke, V. Shvetsov, M. Treiber // Mathematical and Computer Modelling. – 2002. – Vol. 35. – P. 517–547.
11. Helbing D. Gas-kinetic derivation of Navier-Stokes-like traffic equations / D. Helbing // Phys. Rev. E. – 1996. – Vol. 53. – P. 2366–2381.
12. Lighthill M. J. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads / M. J. Lighthill and G. B. Whitham // Proceedings of the Royal Society of London A. – 1955. – Vol. 229. – P. 317–345.
13. Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow / S. Patankar. – McGraw-Hill : Hemisphere Publishing Corporation, 1980. – P. 197.
14. Treiber M. Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models / M. Treiber, A. Kesting, D. Helbing // Physica A. – 2006. – Vol. 360. – P. 71–88.
15. Treiber M. Modeling Lane-Changing Decisions with MOBIL / M. Treiber, A. Kesting // Traffic and Granular Flow'07. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2007. – P. 211–220.
16. Treiber M. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations / M. Treiber, A. Hennecke, D. Helbing // Physical Review E. – 2000. – Vol. 62. – P. 1805–1824.
17. Versteeg H. K. An Introduction to Computational Fluid Dynamics / H. K. Versteeg, W. Malalasekera. – 2nd ed. – UK : Pearson Education Limited, 2007.
18. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme II. Monotonicity and conservation combined in a second order scheme / Van Leer B. // J. Comp. Phys. – 1974. – Vol. 14. – P. 361–370.

References

1. Gasnikov A. V., Klenov C. L., Nurminskiy E. A. *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov* [Introduction to mathematical modeling of traffic flows]. Moscow, MFTI, 2010. – 362 p.
2. Kurts V. V., Anufriev I. E. Solver s kratnymi shagami, obespechivayushchiy kontrol tochnosti po skorosti i distantsii [Multiple-step solver for controlling accuracy in speed and distance]. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Modelling], 2018, vol. 30, no. 9, pp. 87–99.
3. Kurts V. V., Anufriev I. E. Bystryy algoritm s kratnymi shagami dlya zadachi modelirovaniya transportnykh potokov [Fast algorithm with multiple steps for the task of modeling traffic flows]. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Modelling], 2016, vol. 28, no. 5, pp. 124–134.
4. Lesko S. A., Alyoshkin A. S., Barkov A. A. Razrabotka matematicheskogo i programmnogo obespecheniya dlya modelirovaniya i upravleniya transportnymi potokami na osnove perkolyatsionnoy stokhasticheskoy modeli [Development of mathematical and software for modeling and traffic management based on a percolation stochastic model]. *Konvergentnye kognitivnye informatsionnye tekhnologii : materialy II Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Convergent cognitive information technologies : Materials of the II International Scientific Conference] (Convergent 2017, Moscow, Russia, 24–26 Nov., 2017). Moscow, 2017. – P. 454–469.
5. Loytsyanskiy L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and Gas Mechanics]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 395 p.
6. *Ob Osnovnykh napravleniyakh i etapah realizatsii skoordinirovannoy (soglasovannoy) transportnoy politiki gosudarstv – chlenov Evraziyskogo ekonomicheskogo soyuza. Reshenie Vysshego Evraziyskogo ekonomicheskogo soveta ot 26 dekabrya 2016 goda № 19* [On the Main Directions and Stages of Implementing the Coordinated (Coordinated) Transport Policy of the Member States of the Eurasian Economic Union. Decision of the Supreme Eurasian Economic Council of December 26, 2016 No. 19]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/456056120>.
7. Mayorov E. R., Ludan I. R., Motta D. D., Saprykin O. N. Razrabotka mikroskopicheskoy modeli transportnykh potokov goroda v sisteme SUMO [Development of a microscopic model of city traffic flows in the SUMO system]. *Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii : materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii i molodezhnoy shkoly (ITNT-2019)* [Information technologies and nanotechnologies : Proceedings of the V International Conference and Youth School (ITNT-2019)], 2019, pp. 743–747.
8. Chernyshev A. S., Shmidt A. A., Ispolzovanie eylerovo-eylerovskogo podhoda dlya modelirovaniya turbulentnykh techeniy puzyrkovykh sred [Using the Eulerian-Eulerian approach for modeling turbulent flows of bubble media]. *Pisma v ZhTF* [Letters to the PTF], 2013, vol. 39, no. 12, pp. 17–24.
9. Chuvatov M., Glazunov V., Kurochkin L., Popov S. The Technology of Management of Data About Wireless Networks for Vehicle's Telematics Map. *Proceedings of the International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, 2016, vol. 1, pp. 138–143.
10. Helbing D., Hennecke A., Shvetsov V., Treiber M. Micro- and Macro-Simulation of Freeway Traffic. *Mathematical and Computer Modelling*, 2002, vol. 35, pp. 517–547.
11. Helbing D. Gas-kinetic derivation of Navier-Stokes-like traffic equations. *Phys. Rev. E.*, 1996, Vol. 53, pp. 2366–2381.
12. Lighthill M. J., Whitham, G. B. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 1955, vol. 229, pp. 317–345.
13. Patankar S. *Numerical heat transfer and fluid flow*. McGraw-Hill, Hemisphere Publishing Corporation, 1980, p. 197.
14. Treiber M., Kesting A., Helbing D. Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models, *Physica A.*, 2006, vol. 360, pp. 71–88.
15. Treiber M., Kesting A. Modeling Lane-Changing Decisions with MOBIL. *Traffic and Granular Flow '07*. Berlin ; Heidelberg, Springer, 2007, pp. 211–220.
16. Treiber M., Hennecke A., Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 2000, vol. 62, pp. 1805–1824.
17. Versteeg H. K. and Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. 2nd ed., UK, Pearson Education Limited, 2007.
18. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme II. Monotonicity and conservation combined in a second order scheme. *J. Comp. Phys.*, 1974, vol. 14, pp. 361–370.