

# Сравнение результатов моделирования транспортных потоков сплошнoсредними и дискретно-событийными методами

Л. М. Курочкин<sup>1</sup>, М. В. Чуватов<sup>2</sup>, В. В. Глазунов<sup>3</sup>

Санкт-Петербургский политехнический университет

Петра Великого

<sup>1</sup>kurochkinl@spbstu.ru, <sup>2</sup>misha@iktp.spbstu.ru,

<sup>3</sup>glazunov\_vv@spbstu.ru

А. С. Чернышев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук

alexander.tchernyshev@mail.ioffe.ru

**Аннотация.** В работе представлен сравнительный анализ результатов моделирования, полученных при использовании имитационной модели транспортных потоков, учитывающей индивидуальные свойства каждого участника дорожного движения, и гидрогазодинамической модели, описывающей свойства распределения вещества в системе труб. Использование указанных методов моделирования позволяет разрабатывать и анализировать гибридные модели дорожного трафика, обеспечивая описание транспортных систем на микро- и макроуровнях с возможностью перехода между этими уровнями при необходимости. Использование гибридных предсказательных моделей дорожного трафика – является основным инструментом при разработке и использовании интеллектуальных транспортных систем крупных агломераций.

**Ключевые слова:** Имитационные модели дорожного трафика; сплошнoсредние транспортные модели; микро модели; макро модели; гибридные модели дорожного трафика

## I. ВВЕДЕНИЕ

Разработка сервисов интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [1] ведётся с использованием результатов моделирования дорожного и сетевого трафика. Модели дорожного трафика позволяют прогнозировать: загрузку транспортной сети, появление заторов; выявлять и оценивать зависимости параметров движения объектов транспортных сетей. Свойства транспортных потоков: интенсивность движения, характеристики распределения участников движения на дорогах влияют на выбор средств приёма/передачи данных, обеспечивающих надёжный доступ к сервисам ИТС, формируют требования к разработке новых средств [2] и методов надёжных приёма/передачи данных в ИТС [3].

Комплексные дискретные модели ИТС, описывающие как свойства дорожного и сетевого трафика значительных фрагментов дорожных сетей, так и свойства средств приёма/передачи данных каждого объекта ИТС – характеризуются высокой вычислительной сложностью, зависящей от количества моделируемых объектов [4], что

делает применение таких моделей ограниченными при исследовании областей уровня городской агломерации или района [5].

Реализация и использование гибридных моделей ИТС, позволяющих осуществлять переход от описания динамических свойств транспортных потоков дорожных сетей городов и агломераций к описанию свойств конкретных участников ИТС на ограниченном участке дорожной сети (перекрёсток, фрагмент шоссе), т.е. не требующих постоянного описания каждого участника ИТС, обеспечит проведение моделирования и исследований ИТС, не предъявляя повышенных требований к необходимым для выполнения вычислительным ресурсам. Указанные модели позволят оценить зоны ИТС в которых надёжная передача данных невозможна и исследовать причины возникших ограничений.

## II. МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Транспортный поток может быть описан с разной степенью детализации при помощи моделей двух типов: макроскопических и микроскопических моделей.

Макроскопические модели описывают движение потока транспортных средств как движение жидкости или газа [6]. Характеристики потока описываются усреднёнными значениями плотности, скорости, загрузки дорог. Такого рода модели не предъявляют высоких требований к вычислительным ресурсам, но и не позволяют получать детализированные высокоточные результаты.

Микроскопические модели описывают движение каждого транспортного средства индивидуально [7]. Данные модели позволяют описывать движение транспортных потоков по многополосным автострадам, учитывая индивидуальные свойства участников движения. Каждое транспортное средство может быть описано значительным набором параметров, включающих время реакции водителя на дорожное событие, зависимости ускорений от параметров движения «соседних» транспортных средств, приоритеты дорог [8]. Данные модели являются

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №18-07-00430 А

наиболее детализированными, но и наиболее требовательными к вычислительным ресурсам [9].

#### A. Intelligent Driver Model

Предлагаемая модель IDM, относится к классу полных безаварийных микроскопических моделей [10], предоставляющих реалистичные профили ускорения и правдоподобное поведение практически во всех дорожных ситуациях при движении по одной полосе. Структура модели описана следующим образом:

- влияющие факторы – входные данные модели: скорость машины  $v$ , минимальное расстояние до впереди идущей машины  $s$ , скорость впереди идущей машины  $v_l$ , или скорость сближения  $\Delta v = v - v_l$ ;
- выходные данные модели: ускорение  $\frac{dv}{dt}$ , выбранное водителем в текущей ситуации;
- параметры модели описывают стиль вождения моделируемого водителя: быстрая или медленная езда, осторожные или безрассудные маневры, дальновидная или краткосрочная оценка ситуации, и так далее.

Уравнение ускорения в модели IDM:

$$\frac{dv}{dt} = a_{free} + a_{int} = a \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^\delta \right] - a \left( \frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2.$$

Ускорение  $\frac{dv}{dt}$  состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое для свободного потока зависит только от отношения  $\frac{v}{v_0}$  между текущей и желаемой скоростями и производит плавный профиль ускорения с максимумом, заданным параметром модели  $a$  при нулевой скорости, и нулевым ускорением при желаемой скорости. Второе слагаемое всегда принимает отрицательное значение и описывает «отталкивающую», замедляющую силу, производимую впереди идущей машиной. Аналогично отталкивающей силе двух одинаково заряженных по знаку частиц, замедляющая сила пропорциональна  $\frac{1}{s^2}$  с той разницей, что это «взаимодействие» является однонаправленным: впереди идущая машина не «подталкивается» следующей. Это выражение сравнивает желаемую дистанцию между машинами  $s^*$  с действительной дистанцией  $s$ . Желаемая дистанция

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left( 0, vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right),$$

содержит постоянную часть  $s_0 + vT$  и переменную часть  $\frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}$ , реализующую «умную» стратегию торможения.

Если действительная дистанция приблизительно равна  $s^*$ , ускорение торможения практически компенсирует слагаемое свободного ускорения, в результате вычисленное значение ускорения приблизительно равно нулю. Это означает, что выражение  $s_0 + vT$  относится к расстоянию до впереди идущего автомобиля в случае спокойного, равномерного трафика. В дополнение,  $s^*$  увеличивается при приближении к более медленной машине и уменьшается при удалении более быстрой впереди идущей машины. Как следствие, замедление увеличивается при:

- уменьшении расстояния до впереди идущей машины, поскольку водитель стремится соблюдать «безопасную» дистанцию;
- увеличении собственной скорости, так как безопасная дистанция увеличивается;
- увеличении скорости сближения с впереди идущим автомобилем.

Примеры параметров модели IDM приведены в табл. 1. В общем случае, каждый моделируемый водитель может иметь свой собственный набор значений параметров модели. Например, грузовики характеризуются малыми значениями  $v_0$ ,  $a$  и  $b$ , осторожные водители стремятся выдерживать большой временной интервал до впереди идущей машины  $T$ , а «агрессивные» водители характеризуются малым значением  $T$  одновременно с высокими значениями  $v_0$ ,  $a$  и  $b$ .

ТАБЛИЦА I ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ IDM

Параметр	Значение
Желаемая скорость $v_0$ при движении по свободной дороге	88, 108, 128 км/ч
Желаемый «безопасный» временной интервал до впереди идущей машины	1.5 с
Входной поток	3500 машин/час
Минимальное расстояние до впереди идущей машины	2 м
Ускорение $a$ при повседневной езде	0.3 м/с <sup>2</sup>
Комфортное значение замедления $b$	3 м/с <sup>2</sup>
Показатель экспоненты ускорения $\delta$	4

Смена полосы движения происходит в том случае, когда целевая полоса является более предпочтительной (мотивирующий критерий), и при этом маневр может быть выполнен безопасно (безопасный критерий). В модели перестроения MOBIL оба этих критерия основываются на значениях ускорений в прежней и целевой полосах движения, вычисленных с помощью продольной модели – IDM.

Безопасный критерий удовлетворяется, если IDM-замедление при торможении  $-a^{IDM}$ , накладываемое на следующую машину  $f'$  на целевой полосе движения после перестроения, не превышает некоторого значения  $b_{safe}$ , что выражается как

$$a'_{f',IDM} > -b_{safe}.$$

В этом выражении значение ускорения  $a'_{f',IDM}$  выражает IDM-ускорение следующей в новом ряду машины  $f'$ , вызванное перестраивающейся машиной после предполагаемого перестроения.

Для оценки мотивирующего критерия необходимо рассмотреть, получит ли водитель рассматриваемой машины преимущество от смены полосы движения в виде увеличенного значения ускорения. Более того, для того, чтобы избежать риска смены полосы в погоне за минимальным преимуществом, в модель введен порог перестроения  $\Delta a_{thr}$ . Также в модели присутствует параметр  $\Delta a_{bias}$ , «притягивающий» машины к левой или правой полосе движения по причине, например, необходимости уехать по ответвлению от основной дороги или для выполнения правила «держаться справа», существующего во многих европейских странах. Таким образом, мотивирующий критерий удовлетворяется, если

$$a'^{IDM} > a^{IDM} + \Delta a_{thr} \pm \Delta a_{bias}$$

Здесь,  $a'^{IDM}$  и  $a^{IDM}$  – соответственно, значения IDM-ускорения рассматриваемой машины до и после предполагаемого перестроения.

### В. Гидрогазодинамическая модель

При рассмотрении автомобильного потока в рамках транспортной сети региона представляется целесообразным проведение аналогии с движением молекул газа или жидкости по каналам сложной структуры. Как известно, при решении задач гидродинамики используется приближение сплошной среды, в рамках которого оперируют не свойствами отдельной частицы, а параметрами континуума в каждой точке вычислительной области. Построение аналогичной модели для автомобильного трафика позволит существенно ускорить расчеты на сложных топологиях транспортных систем.

Представленная макроскопическая модель основана на гидродинамическом приближении к описанию автомобильного трафика. Подразумевается, что основной вклад в динамику движения потока вносят только продольные компоненты скоростей автомобилей, при этом поперечные скорости при перестроении не учитываются. В этом случае основополагающие уравнения можно записать для квазиодномерного движения, при котором координата  $r$  направлена вдоль образующей линии дороги.

Основу модели составляет уравнение неразрывности:

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

отражающее факт сохранения количества автомобилей на участке дороги.

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

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

Первое слагаемое в правой части, выражающее влияние градиента давления в гидродинамике, происходит из аналогии с микромоделью следования за лидером. Это слагаемое отражает тот факт, что каждый водитель учитывает окружающую дорожную обстановку и ускоряется и замедляется в соответствии с поведением соседних транспортных средств.

Второе слагаемое в правой части выражает стремление потока к достижению некоторой скорости  $V_e$ , являющейся оптимальной в данных условиях. Скорость  $V_e$  есть равновесная скорость потока, реализуемая при равномерном и гомогенном режиме движения по дороге. Параметр  $\tau$  является характерным временем релаксации потока на каждом участке дороги, и в общем случае зависит от параметров потока.

Выражение для  $V_e$  имеет в общем случае следующий вид:

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

$V_0$  – 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 медленнее локальной скорости потока. Этот параметр позволяет учитывать локальную неоднородность скорости каждого отдельно взятого транспортного средства в каждой точке дороги.

### III. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проведения эксперимента была подготовлена топология, включающая в себя один въезд на трёхполосное шоссе, поворот шоссе и два однополосных съезда. Топология движения приведена на градиентной диаграмме моделирования на рис. 1. Параметры описанной микромоделей IDM с перестроением автомобилей приведены в табл. 1, результаты сравнения с макромоделью в табл. 2.

ТАБЛИЦА II РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ СРЕДНЕГО ПОТОКА МАШИН

Параметр	Микромодель, машин/час	Макромодель, машин/час
Въезд	3500	3500
Поворот	2900	2899
Выезд	2000	1852



Рис. 1. Распределение скорости автомобильного трафика в гидрогазодинамической модели

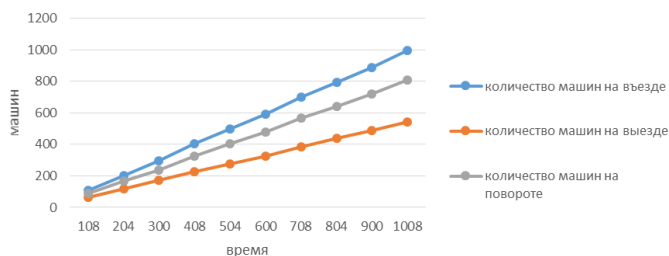


Рис. 2. Количество машин в час на въезде, повороте и съезде при модельной скорости 128 км/ч

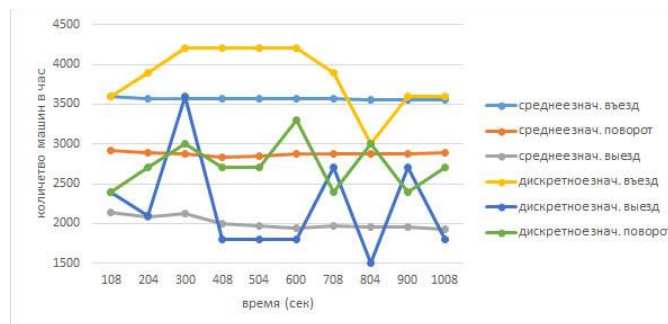


Рис. 3. Количество машин в час на въезде, повороте и съезде при модельной скорости 128 км/ч

В результате проведенного макро и микро моделирования получены зависимости (рис. 2, рис. 3) для трёх контрольных точек: въезд, поворот, выезд, где подсчитывается средняя скорость за всё время моделирования и количество машин прошедших контрольные точки.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам моделирования двумя подходами получены сопоставимые оценки при моделировании потоков движения транспортных средств, которые позволяют использовать гидрогазодинамическую макромодель для построения прогнозов при анализе дорожной обстановки в крупных регионах, вне зависимости от количества моделируемых объектов. В случае, когда требуется детализированная картина движения транспортных средств – используется микромодель на основе IDM.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Chuvatov M., Glazunov V., Kurochkin L. and Popov S. The Technology of Management of Data About Wireless Networks for Vehicle's Telematics Map // In Proceedings of the International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems, 2016, vol. 1, pp 138–143.
- [2] Glazunov V., Kurochkin L., Kurochkin M., Popov S. Instrumental environment of multiprotocol cloud-oriented vehicular mesh network. ICINCO, 2013, Vol. 1, pp. 568–574.
- [3] Glazunov V., Gusihin O., Kurochkin L., Kurochkin M., Popov S. An experimental comparison of dynamic routing protocols in mobile networks. // In Proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2014, vol. 2, pp. 775–782.
- [4] Abed G. A., Ismail M., Jumari K. Traffic Modeling of LTE Mobile Broadband Network Based on NS-2 Simulator // Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, Bali, 2011, pp. 120–125.
- [5] Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и Телемеханика. 2003. № 11. С. 3–46.
- [6] Helbing D., Gas-kinetic derivation of Navier-Stokes-like traffic equations, Phys. Rev. E, 1996, V. 53, P. 2366–2381.
- [7] Lighthill M.J., Whitham F.R.S. On kinetic waves II. A theory of traffic flow on crowded roads // Proc. of the Royal Society Ser. A. 1955. Vol. 229. № 1178. pp. 317–345.
- [8] Treiber M., Kesting A., Helbing D. Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models, Physica A 360. 2006. pp. 71–88.
- [9] Treiber M., Kesting A. Modeling Lane-Changing Decisions with MOBIL. In: Appert-Rolland C., Chevoir F., Gondret P., Lassarre S., Lebacque JP., Schreckenberg M. (eds) Traffic and Granular Flow '07. Springer, Berlin, Heidelberg (2007), pp. 211–220.
- [10] Treiber M., Hennecke A., Helbing D., Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. Physical Review E 62 (2000), pp. 1805–1824.