

DOI: 10.18721/JCSTCS.12409
УДК 004.94

МЕТОД И ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕГРАЦИИ ДИСКРЕТНОЙ И СПЛОШНОСРЕДНОЙ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ РЕГИОНА

В.В. Глазунов¹, М.В. Чуватов¹, А.С. Чернышев², Л.М. Курочкин¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены методы построения континуальных макромоделей и дискретных микромоделей, описаны их ограничения. На основе дискретной модели реализованы сценарии движения транспортных средств в регионах. Рассмотрена континуальная макро модель MFlow собственной разработки, основой для которой являются уравнения Навье-Стокса, что позволяет использовать существующие наработки по численному решению уравнений сохранения и исследованию пузырьковых течений. Разработан метод интеграции дискретной и континуальной модели. Приведены параметры конфигурации и технология моделирования в дискретном симуляторе SUMO. Описаны параметры солвера MFlow и алгоритм решения уравнений в континуальной модели. Проведены эксперименты по сходимости результатов, получаемых в макро- и микромоделях для сценариев движения по прямым участкам дорог и Т-образным перекресткам при различной интенсивности движения транспортных средств.

Ключевые слова: континуальная модель, макро модель, микро модель, SUMO, TraCI, дискретный симулятор, сплошносредная модель, моделирование, транспортные потоки, интеллектуальные транспортные системы.

Ссылка при цитировании: Глазунов В.В., Чуватов М.В., Чернышев А.С., Курочкин Л.М. Метод и технология интеграции дискретной и сплошносредной моделей транспортных потоков региона // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 4. С. 111–122. DOI: 10.18721/JCSTCS.12409

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

THE METHOD AND TECHNOLOGY FOR INTEGRATING DISCRETE AND CONTINUOUS MODELS OF REGIONAL TRAFFIC FLOWS

V.V. Glazunov¹, M.V. Chuvatov¹, A.S. Chernyshev², L.M. Kurochkin¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;

² Ioffe Physical Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

The paper considers the methods of constructing continual macromodels and discrete micromodels, their limitations are described. Based on the discrete model, scenarios of vehicle movement in the regions are implemented. The continual MFlow macromodel of its own design is considered, the basis for which are the Navier-Stokes equations, which allows

the use of existing developments in the numerical solution of conservation equations and the study of bubble flows. The method for integrating a discrete and continuum model is developed. The configuration parameters and modeling technology in the discrete SUMO simulator are presented. The parameters of the MFlow solver and the algorithm for solving equations in the continual model are described. Experiments were conducted on the convergence of the results obtained in macro and micromodels for scenarios of movement along straight sections of roads and T-shaped intersections at different traffic intensities.

Keywords: continual model, macromodel, micromodel, SUMO, TraCI, discrete simulator, continuous-medium model, modeling, traffic flows, intelligent transport systems.

Citation: Glazunov V.V., Chuvatov M.V., Chernyshev A.S., Kurochkin L.M. The method and technology for integrating discrete and continuous models of regional traffic flows. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 4, Pp. 111–122. DOI: 10.18721/JCSTCS.12409

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Задачи моделирования транспортных потоков [1] решаются, начиная с 50-х гг. XIX века. Изначально для моделирования использовались макромодели, в дальнейшем развитие вычислительных средств позволило опуститься на уровень микро-моделирования, позволяющий учитывать особенности движения отдельных транспортных средств [2] и профили водителей [3]. Макромодели [4] дают возможность рассматривать потоки движения транспорта в целом и оперировать усредненными показателями, но не позволяют учитывать траектории движения каждой машины. Примерами макромоделей являются гидродинамические модели движения [5], в которых характеристики движения потока машин рассматриваются как процессы протекания жидкости или газа в трубе. Моделирование в микромоделях происходит посредством решения уравнений для движущихся объектов, согласно выбранной модели движения, например, следования за лидером [6].

Моделирование транспортных потоков дает возможность определять пропускную способность трасс и дорог в регионах и населенных пунктах, предсказывать образование заторов при проектировании дорожной сети. Процесс моделирования дорожного трафика облегчает оценку изменений

инфраструктуры до их реализации, например, эффективность зон охраны окружающей среды или алгоритмов управления светофорами, которые могут быть проверены и оптимизированы в симуляторе перед развертыванием в реальном мире.

Цель статьи – описание разработки механизма сопряжения макро- и микромоделей [7] на примере среды моделирования SUMO [8] и солвера MFlow [9]. Данная интеграция поможет уменьшить вычислительные затраты для расчета модели для дорожных участков с большой протяженностью, а также для участков с высокой плотностью дорожного трафика.

Дискретная модель SUMO

SUMO (Simulation of Urban Mobility) – это дискретно-событийный пакет моделирования движения транспортных средств с открытым исходным кодом, развивающийся с 2001 года. SUMO позволяет моделировать транспортные системы, включая легковые и грузовые транспортные средства, общественный транспорт и пешеходов [10]. В комплект SUMO входит набор инструментов, выполняющих такие задачи, как поиск маршрута, визуализация, создание транспортной сети. SUMO дает возможность создавать пользовательские модели и предоставляет API для удаленного управления симуляцией и интеграции.

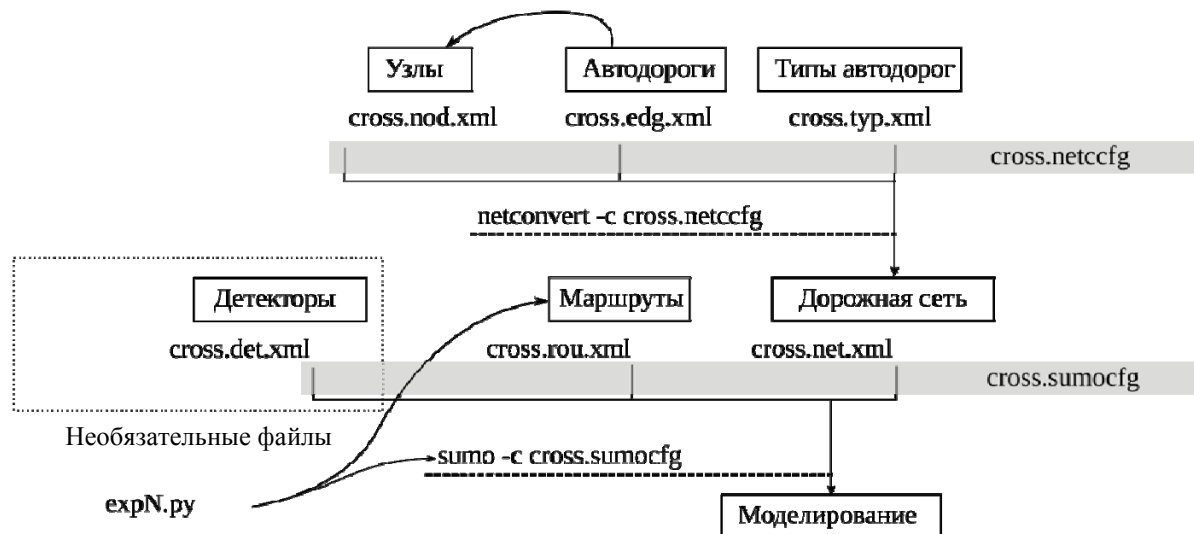


Рис. 1. Схема конфигурации модели при запуске моделирования через TraCI
 Fig. 1. Model configuration when running simulation from TraCI

TraCI (Traffic Control Interface) – модуль симулятора, предоставляющий интерфейс API к моделированию дорожного движения, он позволяет извлекать значения моделируемых объектов и манипулировать их поведением в режиме реального времени. TraCI использует сетевую клиент-серверную архитектуру для взаимодействия с симулятором SUMO. Схема конфигурирования модели приведена на рис. 1.

Конфигурация описывает модель посредством определения параметров в xml-файлах. В файле expN.py указываются параметры запуска транспортных средств, им сопоставляются маршруты движения, задаются счетчики для контроля над процессом моделирования и указывается путь к конфигурационному файлу сценария *.sumocfg, в котором перечислены файлы описания дорожной сети *.net.xml и маршрутов движения транспортных средств *.rou.xml. Также возможно указать путь к файлу *.trip.xml, в который будут записываться треки движения транспортных средств в результате моделирования. Файл описания дорожной сети генерируется с помощью входящей в состав пакета SUMO утилиты netconvert, которая в качестве входных параметров принимает пути к файлам описания узлов дорожной сети *.nod.xml, соединяющих узлы автодорог *.edg.xml, типов автодорог *.type.xml, а выходным параметром указывается имя создаваемого файла описания дорожной сети.

Пример вызова утилиты netconvert:

```
netconvert.exe --node-files xxx.nod.xml --
edge-files yyy.edg.xml -t zzz.type.xml -o
www.net.xml
```

Файл описания узлов дорожной сети содержит перечень узлов в следующем формате: идентификатор узла, координата X (в метрах), координата Y (в метрах). Пример файла для прямой автодороги протяженностью 500 м:

```
<nodes>
  <node id="n01" x="-250" y="0" />
  <node id="n02" x="250" y="0" />
</nodes>
```

Файл описания автодорог содержит перечень участков дорог, соединяющих перечисленные в файле *.nod.xml узлы, в следующем формате: идентификатор узла начала участка, идентификатор узла конца участка, идентификатор участка, тип участка. Пример файла для прямой автодороги, соединяющей узлы n01 и n02, из приведенного выше файла описания узлов:

```
<edges>
  <edge from="n01" to="n02" id="01to02"
type="2L60" />
</edges>
```

Файл описания типов автодорог содержит перечень используемых в эксперименте автодорог в следующем формате: идентификатор типа автодороги, приоритет дороги (используется для определения порядка движения транспортных средств на

нерегулируемых перекрестках), число рядов движения в одном направлении, максимально разрешенная скорость движения по данному типу дороги (м/с). Пример файла для прямой двухполосной дороги с максимальной скоростью 60,12 км/ч:

```
<types>
  <type id="2L60" priority="4" numLanes="2"
speed="16.7" />
</types>
```

Файл описания маршрутов движения транспортных средств содержит перечень типов транспортных средств и перечень маршрутов, по которым осуществляется движение в эксперименте. Типы транспортных средств описываются в следующем формате: ускорение при разгоне (м/с), ускорение при торможении (м/с), идентификатор типа транспортного средства, длина транспортного средства (в метрах), максимальная скорость транспортного средства (м/с), параметр отклонения характера движения от условно-идеального водителя (от 0.0 до 1.0). Маршруты движения транспортных средств описываются в следующем формате: идентификатор маршрута, перечень идентификаторов участков автодорог из файла *.edg.xml, которые должно проследовать транспортное средство в том порядке, в котором эти участки перечислены. Пример файла для эксперимента с движением легковых автомобилей по одному прямому участку дороги:

```
<routes>
  <vType accel="3.0" decel="5.0" id="Car"
length="4.5" maxSpeed="50" sigma="0" />
  <route id="r01" edges="01to02" />
</routes>
```

Архитектура среды моделирования, приведенная на рис. 2, обеспечивает интеграцию микро- и макромоделей с использованием сервера моделирования SUMO и подключение внешних сред моделирования посредством сетевых соединений.

Модуль junction позволяет установить на время симуляции счетчики, фиксирующие прохождение транспортных средств через них. Модуль vehicle позволяет генерировать объект транспортного средства на заданной дороге и полосе движения. Модуль output записывает результат срабатывания детекторов в CSV-файл или отправляет через внешний сокет во внешнюю модель, фиксирует реальное время компьютерного моделирования.

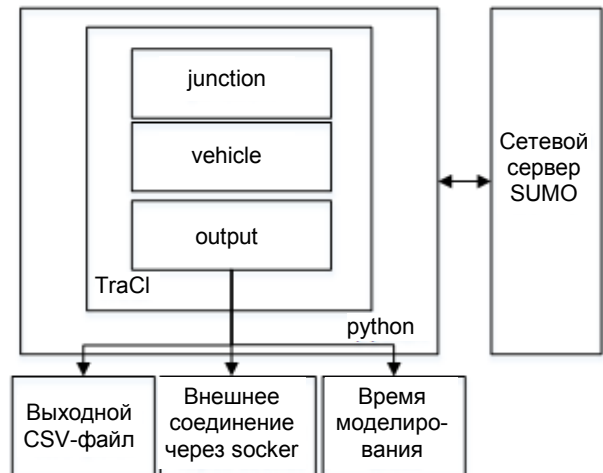


Рис. 2. Архитектура дискретной среды моделирования SUMO

Fig. 2. Architecture of SUMO discrete modelling

Континуальная макро модель MFlow

В основе континуальной модели дорожного трафика лежат уравнения сохранения плотности транспортного потока [11] и его скорости в каждой точке транспортной сети. Подход к описанию движения транспортных средств аналогичен сплошноредному подходу к описанию движения жидкости и газа по трубам, основополагающими уравнениями в котором являются уравнения Навье-Стокса [12]. Таким образом, возможно использование существующих наработок по численному решению уравнений сохранения [13], предложенных в работах по исследованию, в частности, пузырьковых течений [14].

Система уравнений континуальной модели дорожного трафика аналогична системе уравнений Навье-Стокса для сжимаемой среды:

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

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

$$P = \rho \cdot \theta.$$

Здесь ρ – плотность транспортного потока, 1/м; V – скорость потока, м/с; P – эквивалентное давление, отвечающее за влияние соседних автомобилей, м/с²; τ – характерное время релаксации, с; V_e – равновесная

скорость потока, м/с; θ – модельный параметр, отвечающий за перемежаемость автомобилей в потоке и связь между давлением и плотностью, $\text{м}^2/\text{с}^2$.

Первое слагаемое в правой части уравнения сохранения импульса отвечает за взаимодействие соседних автомобилей и нарастает по мере увеличения плотности потока, что отражает взаимодействие отдельных водителей в микромоделях.

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 и отражающая накладываемые ограничения на скоростной режим. Параметр τ является характерным временем релаксации потока на каждом участке дороги и в общем случае зависит от параметров потока и типа транспортного средства.

На входе в расчетную область, что соответствует началу участка дорожной сети, задаются фиксированные значения средней скорости и средней плотности потока. Значения параметров потока берутся из расчета по модели SUMO при помощи процедуры усреднения по времени. На выходе задаются мягкие граничные условия на скорость и плотность потока, а также фиксированное давление.

Для решения системы дифференциальных уравнений используется метод конечных объемов. При этом предполагается, что все величины заданы в центрах ячеек. Построение расчетной сетки осуществляется выдавливанием произвольного сечения вдоль направляющей линии дороги. Таким образом, на каждом участке сетка является квазиодномерной. Проинтегрированные уравнения сохранения для каждой из ячеек сетки имеют вид [15]:

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \phi d\Omega \right) dt + \int_{S_f} \int_{S_f} \rho \phi \vec{V} \cdot \vec{n} dS_f dt = \int_{\Omega} \int_{\Omega} Q d\Omega dt,$$

где Ω – объём ячейки; S_f – площадь поверхности ячейки; f – грань ячейки; ϕ – искомая переменная; Δt – шаг по времени; Q – источниковое слагаемое.

При дискретизации по времени используется неявная схема первого порядка точности. Выражения для всех слагаемых записываются через неизвестные величины на новом временном шаге. Выбор такой схемы обусловлен тем, что она проста в реализации и позволяет выполнять вычисления с большими шагами по времени.

Полное уравнение сохранения с нестационарным слагаемым может использоваться и для расчета стационарных задач. Для обеспечения стабильности расчетной схемы шаг по времени выбирается исходя из критерия Куранта-Фридрихса-Леви $\text{CFL} = \Delta t \frac{U}{L}$.

При выборе шага по времени параметр CFL не должен превосходить заданное значение. Здесь Δt – шаг по времени; U – масштаб скорости; L – линейный масштаб задачи. Для неявной схемы значения CFL могут превосходить единицу.

Выражения для вычисления поверхностного интеграла включают в себя неизвестные значения переменной ϕ_f на гранях ячеек. Для определения значений ϕ_f используются противопоточные схемы второго порядка точности.

Для обеспечения монотонности схема должна обладать свойством TVD (невозрастание полной вариации функции) [16]. В общем случае противопоточные схемы высоких порядков, обладающие свойством TVD, строятся по следующему принципу: в выражение для определения ϕ_f с помощью схемы первого порядка точности, обладающее большой численной диффузией, добавляется антидиффузионное слагаемое. Антидиффузионное слагаемое умножается на нелинейную функцию-ограничитель $\psi(r)$, зависящую от отношения градиентов величины вверх по потоку. Для схем второго порядка точности выражение для ϕ_f имеет вид:

$$\phi_f = \phi_p + \frac{1}{2} \psi(r) (\phi_D - \phi_p),$$

где $r = \frac{\phi_p - \phi_U}{\phi_D - \phi_p}$; P – центр ячейки, включающий грань f ; D – центр ячейки, расположенной вниз по потоку; U – центр ячейки, расположенной вверх по потоку.

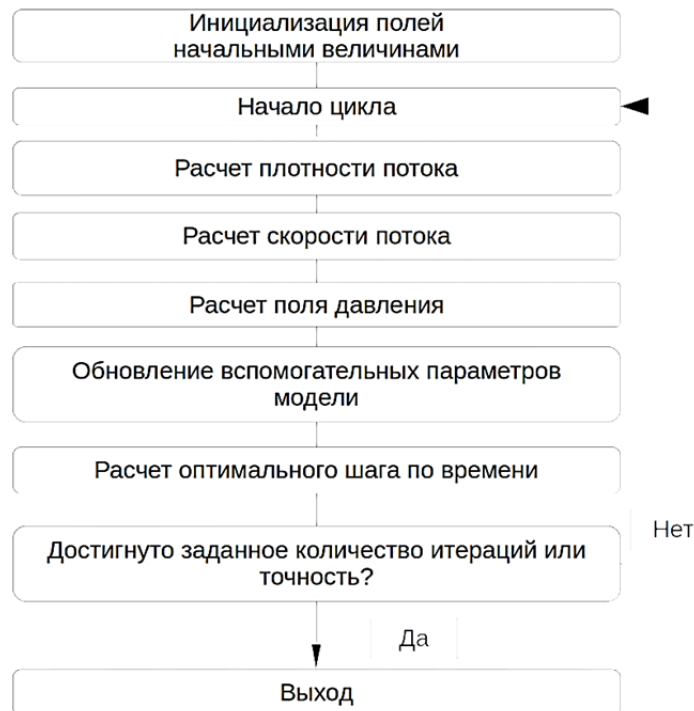


Рис. 3. Блок-схема решения уравнений
Fig. 3. Diagram for solving equations

В литературе существует большое количество выражений для ограничителя $\psi(r)$. В работе использованы три типа ограничителей: ограничитель ван Лиры [17] – $\psi(r) = \frac{r + |r|}{1 + |r|}$, ограничитель *minmod* – $\psi(r) = \max(0, \min(1, r))$ и ограничитель *superbee* – $\psi(r) = \max(0, \min(1, 2 \cdot r), \min(2, r))$ [18]. На основе данных, найденных в литературе [19], для проведения большинства расчетов был выбран ограничитель *minmod* как компромисс по совокупности точности и стабильности расчета.

В целях повышения устойчивости численной схемы используется линеаризация источниковых слагаемых. Для этого источниковое слагаемое разлагается в ряд Тейлора до первой производной относительно переменной ϕ :

$$Q = Q^k + \left(\frac{\partial Q}{\partial \phi} \right)^k (\phi - \phi^k).$$

Величины с индексом k известны и берутся с предыдущего шага по времени.

Это выражение можно переписать в следующем виде:

$$Q = Q_C + Q_P \phi, Q_C = Q^k - \left(\frac{\partial Q}{\partial \phi} \right)^k \phi^k, Q_P = \left(\frac{\partial Q}{\partial \phi} \right)^k.$$

Величина Q_C известна и остается в правой части уравнения. В том случае, когда $Q_P > 0$, перенос второго слагаемого в левую часть уравнения сохранения для ϕ приведет к увеличению диагонального преобладания результирующей матрицы и повышению стабильности численного метода.

Из-за существенной нелинейности решаемых уравнений необходимо ограничивать изменение переменных по ходу итерационного процесса. Обычно это достигается путем введения нижней релаксации. В этом случае значение величины на новой итерации зависит от величины на предыдущей итерации ϕ^* и приращения $\Delta\phi$ следующим образом: $\phi = \phi^* + \lambda \cdot \Delta\phi$.

Величина λ является параметром релаксации и выбирается из условия $0 < \lambda \leq 1$. Решение дискретизованных уравнений и обновление параметров течения происходит по схеме, приведенной на рис. 3, параметры солвера приведены в табл. 1.

Таблица 1
Параметры солвера MFlow

Table 1
MFlow solver parameters

Параметр	Значение
Точность линейных солверов	1E-06
Коэффициенты релаксации переменных	0.9–1.0
Количество итераций	10000
Куранта-Фридрихса-Леви (CFL)	1.0
Точность невязки для решаемых уравнений	1E-04

Интеграция моделей

Для интеграции моделей используется подход, основанный на том, что прямые участки и участки с большой плотностью автомобилей могут быть представлены в качестве сплошноредного потока транспортных средств в модели MFlow. Таким образом, используя архитектуру, представленную на рис. 2, можно подключить выход дорожных участков из дискретной модели в континуальную, а вход континуальной модели обратно в дискретную. Такой подход позволит выполнять моделирование выбранных участков параллельно. Формат выхода дискретной модели SUMO: time; start/end; vID; speed, где time – модельное время; start/end – признак завершения или начала движения ТС по дороге; vID – идентификатор ТС; speed – скорость ТС.

Формат выхода модели MFlow: массив из структур, содержащих time2; vID2; speed2, на основе выходных данных из MFlow запускаются новые машины в транспортном потоке на дискретной модели.

Постановка эксперимента

Для проверки результатов моделирования дискретной и непрерывной моделями, а также для оценки выигрыша в производительности подготовлены четыре сценария, реализованные в SUMO и в MFlow солвере. В первом сценарии (рис. 4 а) моделируется движение транспортных средств по прямому участку двухполосной односторонней автодороги протяженностью 500 м. Транспорт-

ные средства движутся на рисунке слева направо, иногда осуществляя перестроения с одной полосы на другую. Во втором сценарии моделируется движение транспортных средств по такой же дороге протяженностью 5000 м (рис. 4 а), также в направлении слева направо, осуществляя перестроения между полосами. В третьем сценарии (рис. 4 б) моделируется движение транспортных средств по трем однополосным односторонним дорогам протяженностью по 100 м, образующим Т-образный перекресток. Транспортные средства движутся слева направо до перекрестка, на котором в соотношении 1:1 осуществляют поворот налево или направо и продолжают движение, соответственно, вверх или вниз. В четвертом сценарии (рис. 4 в) моделируется движение транспортных средств по трем однополосным односторонним дорогам протяженностью по 100 м, также образующим Т-образный перекресток, но транспортные средства движутся сверху вниз до перекрестка, на котором в соотношении 1:3 осуществляют поворот направо или продолжают движение прямо.

Во всех сценариях для получения данных о количестве и скорости транспортных средств, а также о времени пересечения границ моделируемого участка, используются счетчики, установленные в конце автодорог. В первых двух сценариях используется два счетчика, в третьем и четвертом – три.

Начальная скорость транспортного средства при его появлении в модели равна максимально разрешенной, т. е. 16,7 м/с. Движение транспортного средства в целом отражает реальное поведение водителей. Общие значимые параметры моделей приведены в табл. 2.

В экспериментах с прямыми участками дороги протяженностью 500 и 5000 м транспортные средства запускаются поочередно на каждой из двух полос движения в единственном доступном направлении. При этом, как показало наблюдение за данным экспериментом, транспортные средства, движущиеся в левом ряду, стремятся набрать несколько более высокую скорость, чем движущиеся в правом ряду, что согласуется с поведением водителей в реальной дорожной обстановке. В экспериментах с Т-образным

Таблица 2

Параметры моделей SUMO и MFlow

Table 2

SUMO and MFlow model parameters

Параметр	Значение
Тип транспортного средства	Легковой автомобиль
Длина транспортного средства	4,5 м
Ширина транспортного средства	1,8 м
Максимальное ускорение и замедление трафика	3 м/с ²
Минимальный продольный интервал	2,5 м
Максимально разрешенная скорость движения по автодороге	16,7 м/с (60,12 км/ч)



Рис. 4. Схема движения: а – Прямой участок двухполосной односторонней автодороги протяженностью 500 или 5000 м; б – Т-образный перекресток с подъездом транспорта слева или сверху

Fig. 4. Traffic scheme: а – The straight section of a two-lane one-way road with a length of 500 or 5000 m; б – T-cross with vehicles flow from the left or top

перекрестком транспортные средства запускаются в заданном направлении по единственной доступной полосе движения. Если скорость движения транспортных средств и занятость участка дороги не позволяет разместить новое транспортное средство – его запуск отменяется до следующей попытки. Попытки запуска транспортных средств осуществляются каждые 2, 4, 10, 20, 40, 100 шагов симуляции. Запуск транспортных средств по числу шагов моделирования осуществляется для решения проблемы повторяемости эксперимента при многократных запусках. Как показало наблюдение за экспериментами, при одинаковых начальных условиях результаты моделирования в рамках выбранного сценария повторяются от запуска к запуску, что позволяет исключить случайные факторы при согласовании с непрерывной моделью.

В континуальной модели установлены соответствующие коэффициенты для запуска транспортных потоков, сопоставленные с дискретной моделью: 20 – 1; 40 – 0,5; 100 – 0,2; 10 – 2; 4 – 5; 2 – 10.

В результате проведенных экспериментов выявлены зависимости для сценариев движения транспортных средств, позволяющие использовать для расчета движущихся транспортных средств на определенных участках модель MFlow.

Так как модель SUMO дискретна, необходимо включить процедуру усреднения выходных данных модели для возможности их использования в качестве входных данных в континуальной модели дорожного трафика.

На рис. 5–7 темным цветом представлены графики изменения по времени мгновенной величины автомобильного потока на выходах из соответствующих дорожных

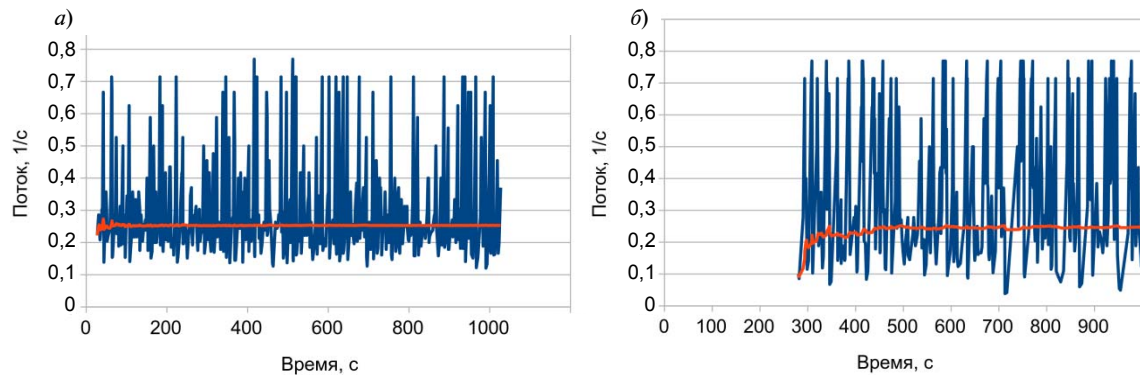


Рис. 5. Результаты моделирования SUMO и усредненные значения для прямого участка с интервалом запуска ТС 20 шагов: *a* – 500 м; *б* – 5000 м

(—) – усредненный транспортный поток; (—) – мгновенный транспортный поток

Fig. 5. SUMO simulation results and average values for the straight section with an interval of starting vehicles every 20 steps: *a* – 500 m; *б* – 5000 m

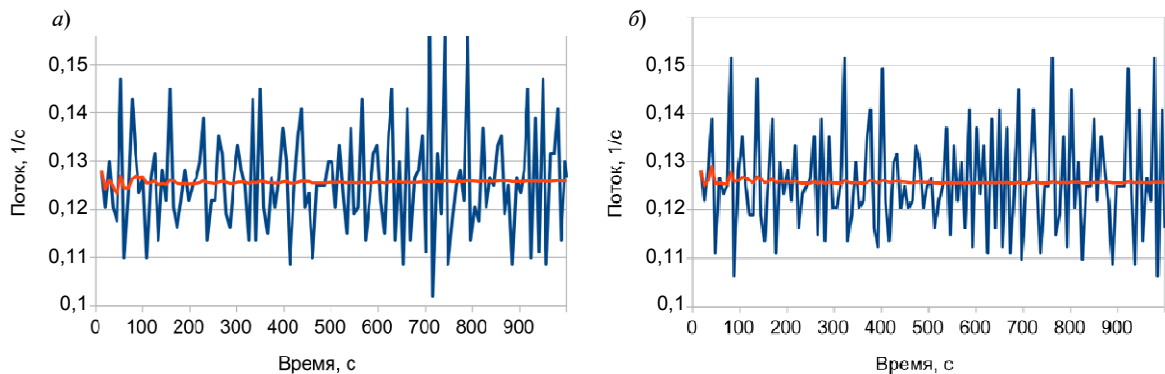


Рис. 6. Результаты моделирования SUMO и усредненные значения для Т-образного перекрестка с интервалом запуска ТС 40 шагов: *a* – поворот налево; *б* – поворот направо

(—) – усредненный транспортный поток; (—) – мгновенный транспортный поток

Fig. 6. SUMO simulation results and averaged values for the T-cross with an interval of starting vehicles every 40 steps: *a* – left turn; *б* – right turn

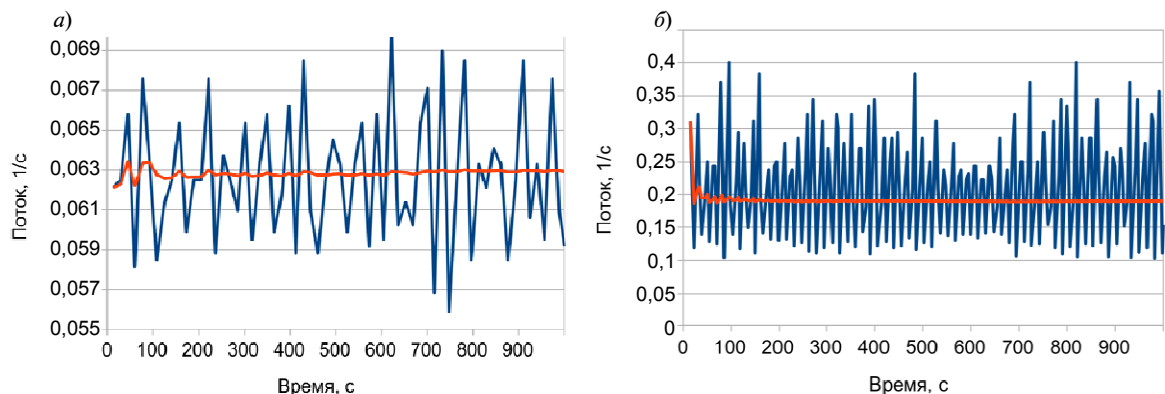


Рис. 7. Результаты моделирования SUMO и усредненные значения для Т-образного перекрестка с интервалом запуска ТС 40 шагов: *a* – поворот направо; *б* – движение прямо

(—) – усредненный транспортный поток; (—) – мгновенный транспортный поток

Fig. 7. SUMO simulation results and averaged values for the T-cross with an interval of starting vehicles every 40 steps: *a* – right turn; *б* – straight

участков, полученные по результатам работы модели SUMO. Несмотря на то, что входной поток машин задавался равномерным и односкоростным, результирующие значения существенно неоднородны по времени. Это связано с особенностью реализации модели, в которой каждый из участников дорожного движения подстраивается к особенностям потока за счет ускорения и замедления, а также перестроения или обгона других участников. Это приводит к отклонениям в скорости движения по мере прохождения участка дороги и, как следствие, к нестационарности поведения потока машин на выходе. Очевидно, что при заданном потоке машин на входе и отсутствии съездов (неконтролируемых источников и стоков для ТС), поток на выходе должен в стационарном режиме быть равен потоку на входе. Для определения выхода на стационарный режим использовалась процедура усреднения по времени, в качестве критерия достижения стационарности выступала нормированная на входной поток разность суммарных потоков на выходе и входе в область. Значение критерия не должно было превосходить некоторую заданную величину (в расчетах равную 0,001), достаточную для минимизации влияния неточности при расчете потока.

Усредненные по времени значения на рис. 5–7 представлены светлыми кривыми. Для каждого момента времени рассчитывалось среднее значение. С увеличением полного времени моделирования среднее значение стремилось к значению на входе. Отсчет среднего начинался с того момента, когда первая машина проходила выходную границу дороги. Как видно из анализа данных для прямых участков, модель SUMO быстро выходит на стационарный режим для случаев малой плотности потока или короткого участка. Это можно объяснить несколько меньшим разбросом по значениям для короткой дороги и малым влиянием соседних ТС для случая длинной дороги и малой плотности машин. Для

этих случаев выход на стационар занимал менее 800 с моделированного времени. С увеличением плотности время, необходимое для достижения нужной точности, растет и достигает 2000 с для варианта 5000 м с интервалом запуска ТС 20 шагов.

В случае с Т-образным перекрестком приведены данные по отдельным съездам. Видно, что когда потоки разделяются на два равных, сходимости у правого и левого съездов дороги примерно одинаковая. В том случае, когда потоки делятся в соотношении 1:3, сходимости у съезда с меньшим количеством машин худшая. Это объясняется тем, что на общем участке дороги накапливается неоднородность по потоку. После развилки из-за падения плотности необходимо большее время для накопления статистики, для того чтобы за счет достаточного количества машин выйти на требуемую точность.

Заключение

Произведено построение сетей дорожного трафика в макро- и микромоделях в типовых сценариях для прямых участков дорог и перекрестков с различными режимами движения. Результаты позволяют сделать вывод о применимости макроподхода для усредненных величин прохождения транспортного потока, рассчитываемых в макромоделе MFlow.

Разработано техническое решение, позволяющее построить гибридную модель движения транспортных средств, включающую сопряжение микро- и макромоделей, что позволяет использовать преимущество макромоделей в потоках высокой плотности и протяженности, получая константное время решения при таком же результате.

В дальнейшем возможно построение и сопоставление более сложных макромоделей, включающих наличие светофоров и дорожных препятствий на полосах.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швецов В.И., Алиев А.С. Математическое моделирование загрузки транспортных сетей. М.: Едиториал УРСС, 2003. 64 с.
2. Newell G.F. A simplified car-following theory: a lower order model. // *Transp. Res.* 2002. Vol. 36. Pp. 195–205.
3. Yang Q., Koutsopoulos H.N. A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems // *Transportation Research. Part C*. 1996. Vol. 4(3). Pp. 113–129.
4. Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б. Введение в математическое моделирование транспортных потоков. М.: МФТИ, 2010. 362 с.
5. Krauß S., Wagner P., Gawron C. Metastable states in a microscopic model of traffic flow // *Physical Review E*. 1997. Vol. 55. No. 304. Pp. 55–97.
6. Hidas P. Modeling lane changing and merging in microscopic traffic simulation // *Transportation Research. Part C*. 2002. Vol. 10(5). Pp. 351–371.
7. Курочкин Л.М., Чуватов М.В., Глазунов В.В., Чернышев А.С. Сравнение результатов моделирования транспортных потоков сплошными и дискретно-событийными методами // *Международная конф. по мягким вычислениям и измерениям*. 2018. Т. 1. С. 500–503.
8. Haddouch S., Nachimi H., Hmina N. Modeling the flow of road traffic with the SUMO simulator // *4th Internat. Conf. on Optimization and Applications*. Mohammedia. 2018. Pp. 1–5.
9. Чернышев А.С., Шмидт А.А. Использование эйлерово-эйлеровского подхода для моделирования турбулентных течений пузырьковых сред // *Письма в журнал технической физики*. 2013. Т. 39. № 12. С. 17–24.
10. Lim K.G., Lee C.H., Chin R.K.Y., Beng Yeo K., Teo K.T.K. SUMO enhancement for vehicular AD Hoc network (VANET) simulation // *2017 IEEE 2nd Internat. Conf. on Automatic Control and Intelligent Systems*. Kota Kinabalu, 2017. Pp. 86–91.
11. 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.
12. Helbing D. Gas-kinetic derivation of Navier-Stokes-like traffic equations // *Phys. Rev. E*. 1996. Vol. 53. Pp. 2366–2381.
13. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. М.: Дрофа, 2006.
14. Chernyshev A., Schmidt A., Kurochkin L. Numerical modeling of polydisperse bubbly flows by the openMP parallel algorithm // *Proc. Comp. Sci. ICCS-2017*. Zurich Switzerland, 2017. Vol. 108C. Pp. 1990–1997.
15. Versteeg H.K., Malalasekera W. *An introduction to computational fluid dynamics*. Pearson Education Limited, UK, 2007.
16. Hirsch Ch. *Numerical computation of internal & external flows: fundamentals of numerical discretization*. New York: John Wiley & Sons, 1988.
17. 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.
18. Roe P.L. Characteristic-based schemes for the Euler equations // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1986. Vol. 18. Pp. 337–365.
19. Чирков Д.В., Черный С.Г. Сравнение точности и сходимости некоторых TVD-схем // *Вычислительные технологии*. 2000. Т. 5. № 5. С. 86–107.

Статья поступила в редакцию 27.09.2019.

REFERENCES

1. Shvetsov V.I., Aliyev A.S. *Matematicheskoye modelirovaniye zagruzki transportnykh setey* [Mathematical modeling of loading transport networks]. Moscow: Yeditorial URSS Publ., 2003, 64 p. (rus)
2. Newell G.F. A simplified car-following theory: A lower order model. *Transp. Res.*, 2002, Vol. 36, Pp. 195–205.
3. Yang Q., Koutsopoulos H.N. A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. *Transportation Research. Part C*, 1996, Vol. 4(3), Pp. 113–129
4. Gasnikov A.V., Klenov S.L., Nurminskiy Ye.A., Kholodov Ya.A., Shamray N.B. *Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye transportnykh potokov* [Introduction to mathematical modeling of traffic flows]. Moscow: MFTI Publ., 2010, 362 p. (rus)
5. Krauß S., Wagner P., Gawron C. Metastable states in a microscopic model of traffic flow. *Physical Review E*, 1997, Vol. 55, No. 304, Pp. 55–97.
6. Hidas P. Modeling lane changing and merging in microscopic traffic simulation. *Transportation Research. Part C*, 2002, Vol. 10(5), Pp. 351–371.

7. **Kurochkin L.M., Chuvatov M.V., Glazunov V.V., Chernyshev A.S.** Sravneniye rezultatov modelirovaniya transportnykh potokov sploshnosrednymi i diskretno-sobytiynym metodami [Comparison of the results of modeling traffic flows with continuous and discrete-event methods]. *XXI Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam [The XXI International Conference on Soft Computing and Measurement]*, 2018, Vol. 1, Pp. 500–503. (rus)
8. **Haddouch S., Hachimi H., Hmina N.** Modeling the flow of road traffic with the SUMO simulator. *2018 4th International Conference on Optimization and Applications*, Mohammedia, 2018, Pp. 1–5.
9. **Chernyshev A.S., Shmidt A.A.** Ispolzovaniye eylerovo-eylerovskogo podkhoda dlya modelirovaniya turbulentnykh techeniy puzyrkovykh sred [Using the Eulerian-Eulerian approach for modeling turbulent flows of bubble media]. *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki [Technical Physics Letters]*, 2013, Vol. 39, No. 12, Pp. 17–24. (rus)
10. **Lim K.G., Lee C.H., Chin R.K.Y., Beng Yeo K., Teo K.T.K.** SUMO enhancement for vehicular ad hoc network (VANET) simulation. *2017 IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems*, Kota Kinabalu, 2017, Pp. 86–91.
11. **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.
12. **Helbing D.** Gas-kinetic derivation of Navier-Stokes-like traffic equations, *Phys. Rev. E*, 1996, Vol. 53, Pp. 2366–2381.
13. **Loytsyanskiy L.G.** *Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid and gas mechanics]*. Moscow: Drofa Publ., 2006. (rus)
14. **Chernyshev A., Schmidt A., Kurochkin L.** Numerical modeling of polydisperse bubbly flows by the openMP parallel algorithm. *Proc. Comp. Sci. ICCS-2017*, Zurich Switzerland, 2017, Vol. 108C, Pp. 1990–1997.
15. **Versteeg H.K., Malalasekera W.** *An introduction to computational fluid dynamics*. Pearson Education Limited, UK, 2007.
16. **Hirsch Ch.** *Numerical computation of internal & external flows: fundamentals of numerical discretization*. New York: John Wiley & Sons, USA, 1988.
17. **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.
18. **Roe P.L.** Characteristic-based schemes for the Euler equations. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1986, Vol. 18, Pp. 337–365.
19. **Chirkov D.V., Chernyy S.G.** Sravneniye tochnosti i skhodimosti nekotorykh TVD-skhem [Comparison of accuracy and convergence of some TVD schemes]. *Vychislitelnyye tekhnologii [Computational Technologies]*, 2000, Vol. 5, No. 5, Pp. 86–107. (rus)

Received 27.09.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ГЛАЗУНОВ Вадим Валерьевич

GLAZUNOV Vadim V.

E-mail: neweagle@gmail.com

ЧУВАТОВ Михаил Владимирович

CHUVATOV Mikhail V.

E-mail: misha@iktp.spbstu.ru

ЧЕРНЫШЕВ Александр Сергеевич

CHERNYSHEV Alexander S.

E-mail: alexander.tchernyshev@mail.ioffe.ru

КУРОЧКИН Леонид Михайлович

KUROCHKIN Leonid M.

E-mail: kurochkinl@spbstu.ru