



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 93 за 2016 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Трапезникова М.А., Чечина А.А.,
Чурбанова Н.Г.

Описание динамики
транспортных потоков на
элементах улично-дорожной
сети с использованием
двумерных математических
моделей

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г. Описание динамики транспортных потоков на элементах улично-дорожной сети с использованием двумерных математических моделей // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2016. № 93. 20 с. doi:[10.20948/prepr-2016-93](https://doi.org/10.20948/prepr-2016-93)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-93>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

М.А.Трапезникова, А.А. Чечина, Н.Г. Чурбанова

**Описание динамики
транспортных потоков
на элементах улично-дорожной сети
с использованием двумерных
математических моделей**

Москва — 2016

Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г.

Описание динамики транспортных потоков на элементах улично-дорожной сети с использованием двумерных математических моделей

В препринте приводится описание двух математических моделей, использующих макро- и микроскопический подходы для описания автотранспортных потоков. Макроскопическая модель использует идеологию квазигазодинамической системы уравнений. Микроскопическая модель основана на теории клеточных автоматов. Приводятся некоторые результаты расчетов, в том числе на параллельных вычислительных системах.

Ключевые слова: автотранспортные потоки, микро- и макроскопические подходы, эффективность распараллеливания.

Marina Alexandrovna Trapeznikova, Antonina Alexandrovna Chechina, Natalia Gennadievna Churbanova

Traffic flow dynamics on road network fragments using two-dimensional mathematical models.

Two mathematical models of traffic flows, based on macro- and microscopic approaches, are considered. Macroscopic model uses quasi-gas-dynamic system of equations. Microscopic model is based on cellular automata theory. Test results for several numerical experiments, including parallel calculations, are adduced.

Key words: traffic flows, micro- and macroscopic approach, parallelization efficiency.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 16-01-00347-а, 16-31-00087-мол.

Введение

В теории транспортных потоков рассматриваются два основных направления построения математических моделей движения автотранспорта: макро- и микроскопический подходы. Каждый из них имеет свои особенности, возможности и области применения. При исследовании динамики транспортных потоков на больших расстояниях, когда имеет место так называемое "ограниченное" движение, то есть расстояние между отдельными транспортными единицами сопоставимо с размерами автомобиля, а следовательно, все водители вынуждены придерживаться приблизительно одинаковых стратегий, логично использовать макроскопический подход. В этом случае, рассмотрению подлежат только следующие характеристики потока: плотность (количество автомобилей на единицу длины дороги и на полосу), скорость и величина потока, осредненные в данной точке на данный момент времени. Поскольку осреднение локальное, данные величины могут изменяться в пространстве и во времени, а следовательно, есть возможность исследования эволюции динамики потоков автотранспорта. При использовании таких моделей проводится аналогия с газовой динамикой и выводятся уравнения, сходные с газодинамическими, но имеющие дополнительные члены, "отвечающие" за "человеческий фактор".

При микроскопическом подходе, напротив, рассматривается поведение отдельных единиц — автомобилей, из которых формируется общий поток. Каждая единица самостоятельно реагирует на ближайшее окружение, может иметь свою собственную, отличную от других, стратегию, может иметь свою цель. Величинами, характеризующими каждую единицу — участницу движения, являются: пространственное положение (координата) на трассе, персональная скорость и персональное ускорение.

В данной работе приводится описание двух моделей, использующих оба основных подхода и позволяющих в явном виде описывать многополосное движение, в частности по трассам с переменной полосностью. Макроскопическая модель построена по аналогии с квазигазодинамической (КГД) системой уравнений [1], а микроскопическая является обобщением однополосной модели Нагеля-Шрекенберга [2], использующей теорию клеточных автоматов, на многополосный случай.

Для реализации макроскопической модели разработаны вычислительный алгоритм на основе явных разностных схем и соответствующий программный модуль, демонстрирующий достаточно высокую эффективность распараллеливания при расчетах на суперкомпьютере К-100. Для реализации микроскопической модели разработаны ряд логических алгоритмов и комплекс программ САМ-2D (Cellular Automata Model 2D case – Модель клеточных автоматов в двумерном случае), позволяющий имитировать поведение системы различных автотранспортных средств на элементах транспортной сети. Представлены результаты тестовых расчетов.

Макроскопическая модель

Как было указано выше, естественными ограничениями применимости макроскопической модели являются: масштаб рассматриваемых участков магистрали, достаточно большая плотность потока, скорость движения, далекая от свободной, единая стратегия водителей (движение к цели, перестроение в полосу с большей скоростью и меньшей плотностью). Указанные предположения позволяют описывать транспортный поток в приближении сплошной среды и рассматривать его как слабосжимаемую жидкость.

При построении модели используются уравнения, аналогичные уравнениям КГД системы, переменными в которых являются плотность ρ , поступательная (вдоль трассы) скорость u , поток $q = \rho u$ как функция плотности и скорости. Отличие разрабатываемой двумерной модели от одномерных аналогов состоит во введении боковой скорости v как скорости перестроения автомобилей из полосы в полосу. Благодаря этому можно описывать транспортные потоки с учетом реальной геометрии магистрали. Кроме того, уравнения содержат дополнительные члены – отвечающие, например, за ускорение и торможение автомобилей как реакции на окружающую обстановку, время релаксации (реакции водителя). Ниже приведена система уравнений для описания динамики транспортных потоков, состоящая из уравнения неразрывности и двух уравнений движения для двух компонент скорости:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_x}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p_x) - f_x + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\tau_y}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 + p_y) - f_y + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) \right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p_x) - f_x + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_x}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho u^3 + 3p_x u) - 3f_x u \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\tau_y}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y}(\rho uv^2 + p_y u) - f_y u \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_x}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y}(\rho u^2 v + p_y v) - f_y v \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\tau_y}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 v + p_x v) - f_x v \right); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 + p_y) - f_y + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_x}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 v + p_x v) - f_x v \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\tau_y}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y}(\rho v^3 + 3p_y v) - 3f_y v \right) + \end{aligned} \quad (3)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_x}{2} \left(\frac{\partial}{\partial y} (\rho v^2 u + p_y u) - f_y u \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\tau_y}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x} (\rho v^2 u + p_x u) - f_x u \right).$$

Здесь $f_x = a_x \rho$, $f_y = a_y \rho$ – ускоряющая и тормозящая силы, $a_x = (u_{eq} - u) / T_x$, $a_y = (v_{eq} - v) / T_y$ – компоненты ускорения, $u_{eq} = u_f (1 - \rho / \rho_{jam})$ – равновесная скорость, зависящая от u_f – скорости свободного движения, и ρ_{jam} – плотности автомобильной «пробки» (при которой движение отсутствует), $T_x = t_{0x} (1 + r \rho / (\rho_{jam} - r \rho))$, $T_y = t_{0y} (1 + r \rho / (\rho_{jam} - r \rho))$ – время релаксации, $p_x = \lambda_x \frac{\rho^{\beta_x}}{\beta_x}$, $p_y = \lambda_y \frac{\rho^{\beta_y}}{\beta_y}$ – аналог давления как реакция водителя на ситуацию впереди автомобиля. Отдельно следует отметить, что на практике более удобным оказалось использовать вместо уравнения (3) уравнение для введенной авторами равновесной боковой скорости как суммы трех слагаемых:

$$v_{eq} = k_u \rho \frac{\partial u}{\partial y} - k_\rho u \frac{\partial \rho}{\partial y} + k_{des} \frac{u^2}{(x_{des} - x)^2} (y_{des} - y), \quad (4)$$

где первое слагаемое отражает стремление водителя перестроиться в полосу с большей скоростью, второе – перестроиться в полосу с меньшей плотностью, третье – достичь определенной цели с координатами (x_{des}, y_{des}) .

Уравнения (1)-(3) так же, как и уравнения КГД системы уравнений, содержат в правых частях малые параметры τ_x и τ_y . Эти параметры можно интерпретировать как характерное время задачи, например, время пересечения одной точки несколькими автомобилями. Однако в условиях ограниченного движения их можно считать константами, так как они мало зависят от скорости.

Довольно большое количество используемых констант и параметров являются эмпирическими и определяются из экспериментальных данных при калибровке модели. Авторами при расчетах использовались следующие значения:

$$\lambda_x = 60 \frac{\text{км}^2}{\text{ч}^2}, \quad \lambda_y = 4 \frac{\text{км}^2}{\text{ч}^2}, \quad \beta_x = 2, \quad \beta_y = 0, \quad \tau_x = 2 \cdot 10^{-3} \text{ч}, \quad \tau_y = 3 \cdot 10^{-4} \text{ч}$$

$$t_{0x} = 50 \text{с}, \quad t_{0y} = t_{0x} \frac{\tau_y}{\tau_x} = 7.5 \text{с}, \quad r = 0.95, \quad \rho_{jam} = 120 \frac{\text{авт}}{\text{км} \cdot \text{полоса}}, \quad u_f = 90 \frac{\text{км}}{\text{ч}}, \quad u_{\max} = 90 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$$

Иногда движение транспорта представляет собой неоднородный поток – например, разные типы транспорта имеют разные ограничения по скорости, разные цели и т.д. Для описания таких потоков вводится понятие многокомпонентности, где каждая компонента – это группа автомобилей, объединенных какими-то общими характеристиками – плотностью, скоростью, боковой скоростью, конечной целью. Соответствующая система уравнений

содержит уравнения неразрывности, уравнения сохранения импульса и уравнения боковой скорости для каждой компоненты.

Вычислительный модуль, реализующий макроскопическую модель, состоит из набора подпрограмм: подпрограммы подготовки входных данных, подпрограммы численного решения входящих в модель уравнений, подпрограммы обработки полученных результатов. В качестве внешних входных данных задаются:

- двумерная расчетная область, состоящая из прямоугольных подобластей в соответствии с реальной геометрией магистрали;
- входной поток (количество автомобилей в час);
- скорость свободного движения (км/ч);
- максимальная разрешенная скорость (км/ч);
- плотность пробки (количество автомобилей на километр на полосу);
- координаты въездов/съездов;
- входные потоки на въездах;
- координаты цели движения.

Пример тестового расчета с использованием макроскопической модели

В качестве тестовой задачи рассмотрим задачу о двухкомпонентном потоке — движении по магистрали автотранспортных средств двух видов: грузовых автомобилей, движение которым на рассматриваемом участке разрешено только по самой крайней полосе, и легковых автомобилей, которые могут двигаться по любым полосам в соответствии со своими желаниями и возможностями. Постановка задачи приведена на рис. 1:

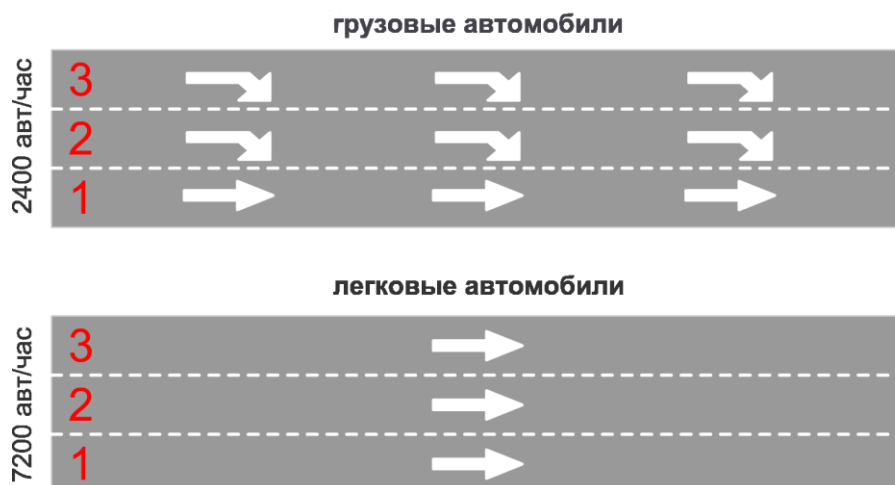


Рис. 1. Постановка задачи о двухкомпонентном потоке

В начальный момент времени входной поток обеих компонент потока распределен равномерно по трем полосам. Однако грузовым автомобилям поставлена цель съехать в процессе движения на крайнюю полосу.

Поле плотности установившегося течения показано на рис. 2. Красный цвет соответствует наибольшей плотности, синий – наименьшей.

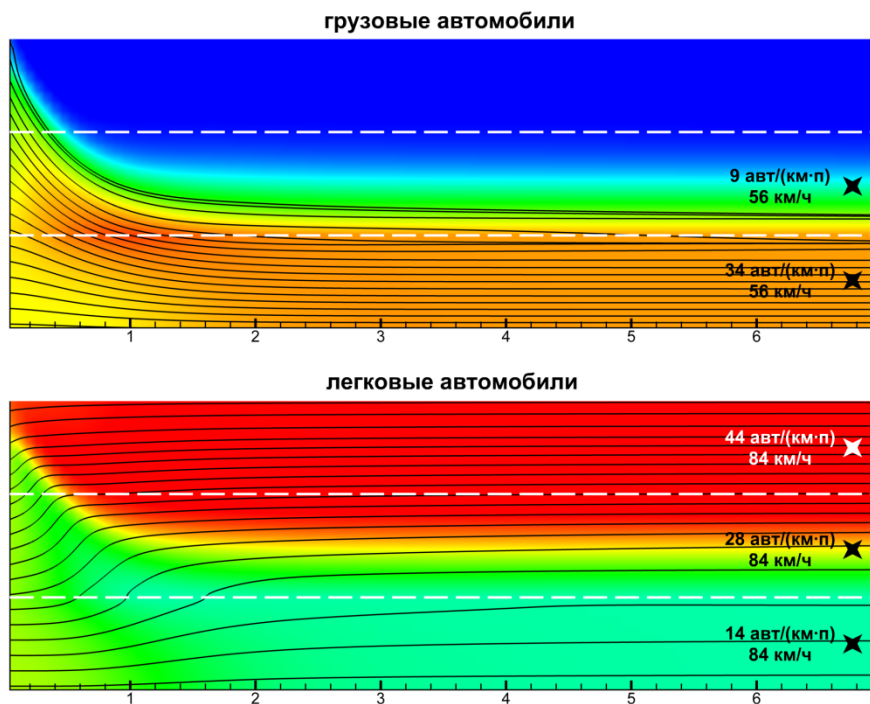


Рис. 2. Поле плотности установившегося течения задачи о двухкомпонентном потоке

Из рисунка видно, что грузовые автомобили заняли в основном крайнюю полосу, в верхней полосе они отсутствуют. Легковые же, наоборот, едут в основном по верхней полосе, хотя и в крайней полосе их плотность не нулевая.

Численная реализация макроскопической модели основана на явном алгоритме, обладающем высокой эффективностью при распараллеливании с использованием техники декомпозиции области (разделение данных) и обмене данными между узлами кластера. Расчеты проводились на гибридной системе К-100 с пиковой производительностью 100 TFLOPS. Было получено достаточно высокое ускорение:



Рис. 3. Ускорение в зависимости от числа процессоров

Рис. 3 демонстрирует ускорение более чем в 15 раз на 100 процессорах по сравнению с 5 процессорами на сетке в три миллиона расчетных точек.

Микроскопическая модель

В основу многополосной модели положена одномерная модель Нагеля-Шрекенберга [2], использующая идеологию клеточных автоматов. Ранее этот подход представлялся наиболее перспективным для детального описания локальных дорожных ситуаций на небольших расстояниях, так как модели являются достаточно гибкими благодаря возможности реализовать любую стратегию водителя без существенных алгоритмических затрат. Однако в связи с существующей в настоящее время вычислительной техникой сверхвысокой производительности модели данного типа могут с успехом применяться и для моделирования движения на больших дорожных сетях.

Трасса в [2] представляется в виде одномерной решетки, каждая ячейка которой может либо быть пустой, либо содержать частицу, обозначающую транспортное средство. Частицы перемещаются из одной ячейки в другую (свободную) в одном направлении. В случае однополосного движения они не могут обгонять друг друга. Вся система – пространство, время, скорость – дискретна. Предметом рассмотрения является состояние всей системы в отдельные последовательные моменты времени. Скорость показывает, на сколько ячеек автомобиль перемещается за один шаг по времени. Ускорение происходит мгновенно между шагами. На каждом слое по времени происходит обновление состояния системы по определённым правилам с определёнными вероятностями. Обновление в модели Нагеля-Шрекенберга состоит из четырех шагов:

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

- 2) Торможение. Скорость автомобиля уменьшается на единицу, если есть угроза столкновения с впереди идущим автомобилем.
- 3) Случайные возмущения. Если скорость автомобиля положительна, то она может быть уменьшена на единицу с некоторой вероятностью.
- 4) Движение. Каждый автомобиль продвигается вперед на количество ячеек, соответствующее его новой скорости после выполнения предыдущих шагов.

В работе [3] приводится подробное описание обобщения одномерной модели Нагеля-Шрекенберга на многополосный случай, выполненного авторами статьи. Коротко двумерная модель может быть описана следующим образом. Трасса в этом случае представляет собой двумерную решетку, где количество ячеек в поперечном направлении соответствует числу полос трассы, как показано на рис. 4:

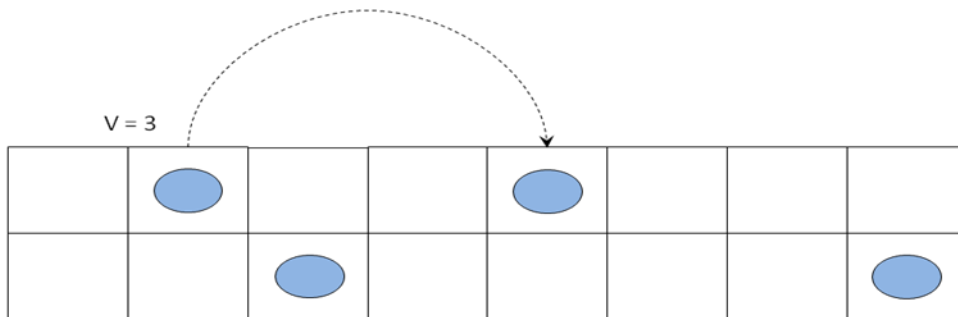


Рис. 4. Расчетная область в обобщенной двумерной микроскопической модели

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

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

Параметры микроскопической модели

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

Шаг по времени в рассматриваемой модели может меняться в зависимости от того, какая минимальная скорость автомобиля будет разумной для решения конкретной задачи. Например, если шаг по времени равен 1 секунде, минимальная скорость автомобиля (соответствующая единице в дискретных единицах измерения) составляет 7,5 метров в секунду или 27 километров в час, что не подходит для описания плотных потоков и движения на перекрестках, но

подойдет для решения задач на свободных протяженных участках дорог с малым числом въездов и съездов.

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

Параметры движения АТС

Каждому автомобилю присписывается уникальный номер (ID), по которому можно отследить его положение в системе. Как и в случае одномерного движения, АТС характеризуется текущей и максимальной скоростью. Скорость принимает целые значения от 0 до 4, а при высоких скоростных режимах и более. Если шаг по времени равен одной секунде, то дискретному значению скорости 4 соответствует скорость 108 километров в час, то есть скорость свободного движения автомобиля по автомагистрали.

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

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

Алгоритм заставляет водителей в целевой полосе пропускать машины, которые хотят перестроиться.

Алгоритмы, положенные в основу программной реализации

Общий алгоритм — структура программы.

1) Задание расчетной области в виде двумерной решетки, где количество ячеек в продольном направлении соответствует длине моделируемого элемента трассы, а в поперечном направлении равно числу полос трассы.

2) Задание основных параметров модели: максимальная скорость V_{max} , вероятность в модели Нагеля-Шрекенберга P , общее время счета и т.д.

3) Задание начального состояния расчетной области – определение пустых и занятых автомобилями ячеек. Определение параметров АТС – текущей скорости и цели.

4) Чтение входных данных из файла.

5) Обновление состояния ячеек – выбор из вариантов:

- алгоритм движения по прямолинейному участку;
- алгоритм прохождения регулируемого перекрестка;
- алгоритм прохождения нерегулируемого перекрестка.

6) Если общее время счета не превышено, то возврат к пункту 5), иначе – вывод результатов и конец счета.

Алгоритм задания граничных условий

На каждом временном шаге происходит добавление граничных условий. На вход программе задаются входящие потоки (в автомобилях в минуту) на каждой из дорог с распределением по целям. То есть для каждой из дорог известно число автомобилей, собирающихся проехать перекресток прямо, повернуть направо или налево. На основе этих данных вычисляются номера шагов по времени, на которых следует добавлять автомобиль с определенной целью на нулевой ячейке (въезде) определенной дороги. Если на перекрестке возникает затор и нулевая ячейка оказывается занята, автомобиль попадает в очередь. На каждом шаге проверяется наличие автомобилей в очереди и состояние нулевой ячейки. Как только ячейка освобождается, автомобиль из очереди попадает в нее. Схема алгоритма добавления граничных условий представлена на рис. 5.

Алгоритм движения по прямолинейному многополосному участку

1) Для каждого АТС выясняется возможность и необходимость смены полосы. Если в одном направлении существуют больше чем две полосы, то может возникать конфликт, когда две машины с крайних полос желают сместиться в среднюю и занять одну и ту же ячейку. Для преодоления конфликта разрешается перестроение вправо только на четных шагах, а влево –

только на нечетных. Производится смена полосы по *алгоритму смены полосы*. Этот подшаг выполняется параллельно для всех АТС.

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

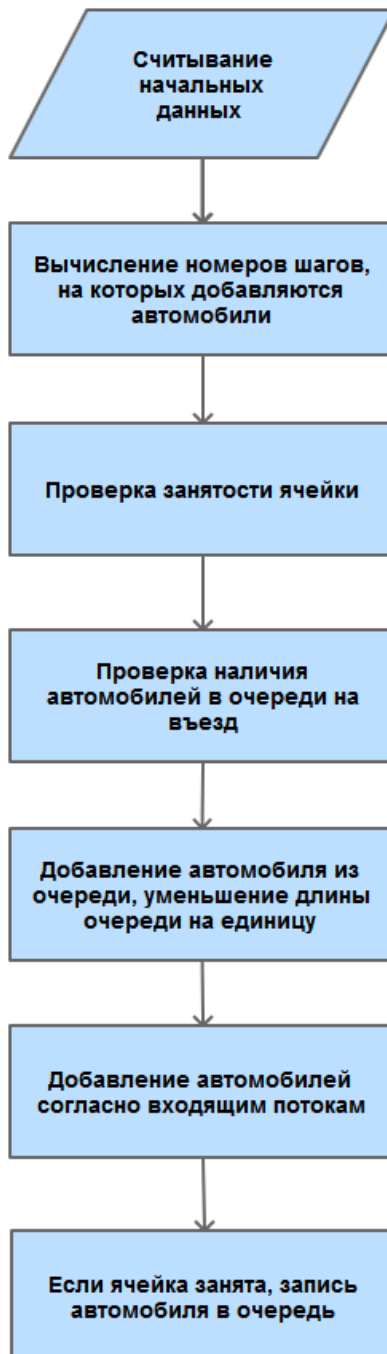


Рис. 5. Блок-схема алгоритма задания граничных условий

Алгоритм смены полосы

Схема алгоритма смены полосы для случая, когда до цели еще достаточно далеко, представлена на рис. 6:

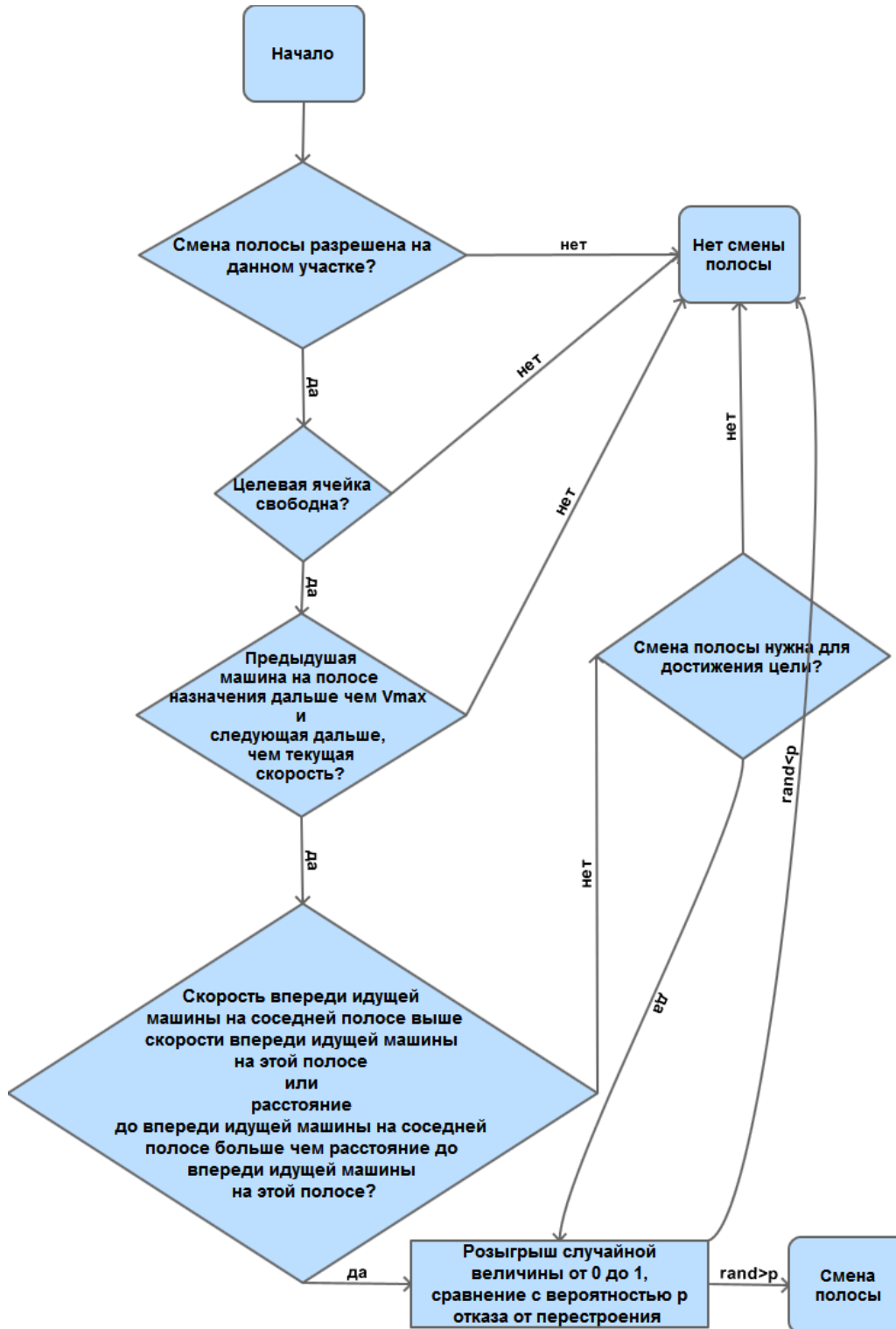


Рис. 6. Блок-схема алгоритма перестроения автомобилей далеко от цели

Проверяются следующие условия:

- машина находится в зоне, где разрешена смена полосы;
- ячейка, на которую перестраивается машина, свободна;
- смена полосы ведет к увеличению скорости (снижению плотности) или необходима для достижения цели;
- условие безопасности: расстояние на целевой полосе позади больше или равно V_{max} , впереди – больше или равно V машины.

Схема алгоритма смены полосы для случая, когда цель близко, представлена на рис 7.

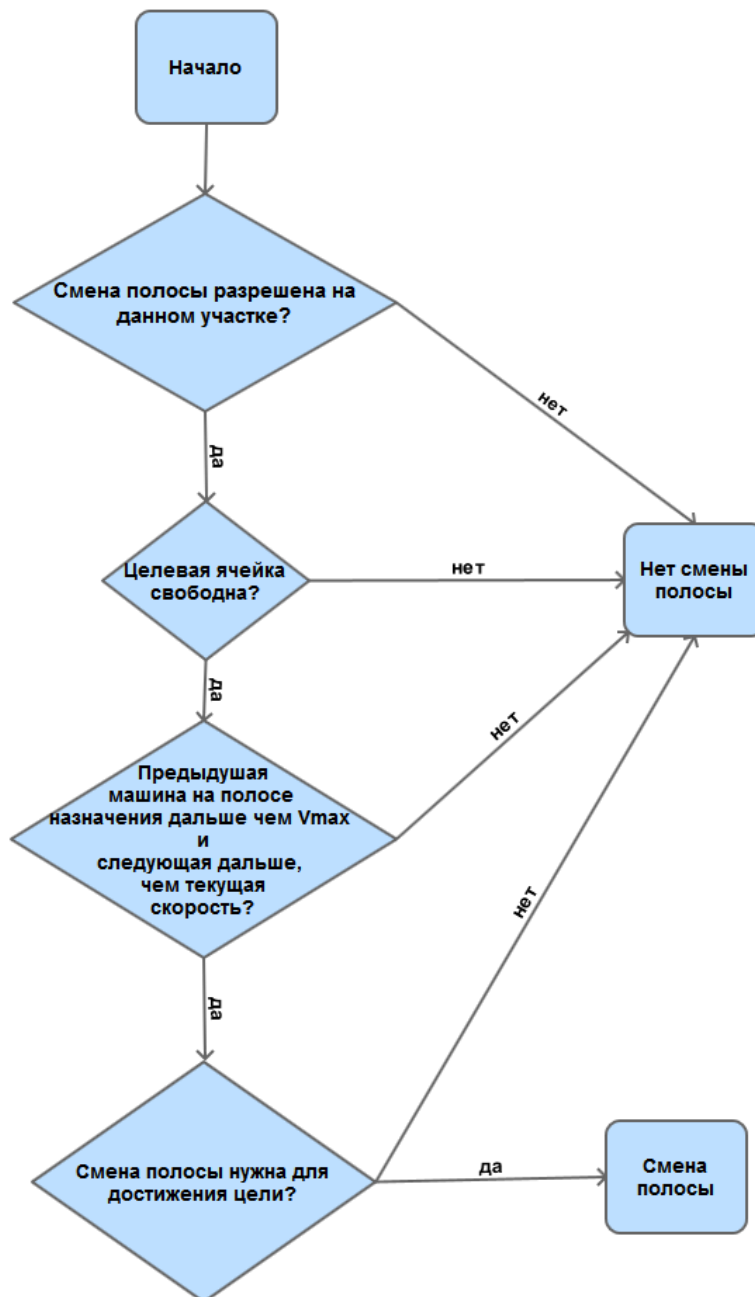


Рис. 7. Блок-схема алгоритма перестроения автомобилей вблизи цели

Начиная с определенного этапа автомобили игнорируют значения плотности и скорости на целевой полосе, желая на нее перестроиться. Тем не менее, водители не могут забыть про правила безопасности и вынуждены им подчиняться. Машины сворачивают на целевую полосу, если цель достаточно близко, при первом удобном случае и больше из этой полосы не уходят.

Может возникнуть ситуация, когда водитель не успевает перестроиться в нужную полосу до самого достижения цели. В таких случаях автомобиль не поворачивает на перекрестке или не съезжает с дороги, то есть не достигает заданной цели.

Дистанция, начиная с которой водители пытаются намеренно перестроиться в целевой ряд, берется из общих соображений и составляет в разных задачах 75-150 метров.

Алгоритм однопососного движения

Алгоритм построен в соответствии с моделью Нагеля-Шрекенберга и выполняется в пункте 5) *общего алгоритма*. К этому моменту для каждой машины с номером n определены скорость V_n от 0 до некоторой величины V_{max} , величина d – расстояние (количество клеток) между текущей машиной и следующей перед ней. Схема обновления представлена на рис. 8:

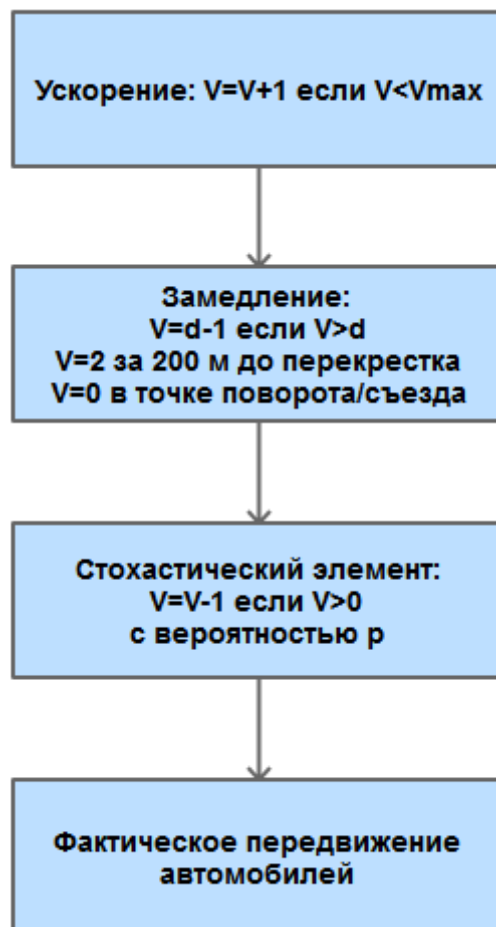


Рис. 8. Блок-схема алгоритма однопососного движения

Алгоритм прохождения регулируемого перекрестка

1) За 200 метров до светофора – перестроение из полосы в полосу по алгоритму смены полосы или запрет перестроения, если это необходимо для поворота (согласно правилам дорожного движения).

2) Ускорение или торможение автомобиля на выбранной полосе согласно алгоритму однополосного движения.

3) Дополнительное снижение скорости при следующих условиях:

- Если цель машины – поворот на перекрестке и она находится в пределах 15 клеток от поворота, то ее скорость ограничивается двумя ячейками. При достижении точки поворота машина останавливается.

- Учет светофорного режима: машины сбрасывают скорость при приближении к горящему красному сигналу светофора: если $V_n > D-1$, то $V_n = D-1$, где D – дистанция до светофора.

- Предотвращение столкновений: если $V_n > d-1$, то $V_n = d-1$, где d – дистанция до ближайшей машины на полосе либо на перекрестке.

4) Случайные возмущения.

5) Перемещение автомобилей с учётом изменений скорости, определяемых пунктами 3)–4).

6) Поворот: автомобили, находящиеся в точке поворота и имеющие соответствующую цель, меняют дорогу.

7) Начинается новый временной шаг.

Алгоритм прохождения нерегулируемого перекрестка при пересечении главной дороги с второстепенной

1) За 200 метров до перекрестка – перестроение из полосы в полосу по алгоритму смены полосы или запрет перестроения, если это необходимо для поворота (согласно правилам дорожного движения).

2) Ускорение или торможение автомобиля на выбранной полосе согласно алгоритму однополосного движения.

3) Дополнительное снижение скорости при следующих условиях:

- Если машина находится в пределах 15 клеток от перекрестка на второстепенной дороге, то вне зависимости от ее цели скорость ограничивается одной ячейкой. При достижении точки поворота машина останавливается.

- Проверка безопасности: если на главной дороге в радиусе 4 ячеек есть автомобили, то автомобиль с второстепенной дороги стоит.

- Предотвращение столкновений: если $V > d-1$, то $V = d-1$, где d – дистанция до ближайшей машины на полосе либо на перекрестке.

4) Случайные возмущения.

5) Перемещение автомобилей с учётом изменений скорости, определяемых пунктами 3)–4).

6) Поворот: автомобили, находящиеся в точке поворота и имеющие соответствующую цель, меняют дорогу. Автомобили, поворачивающие налево,

при этом проверяют наличие машин на пересекаемой дороге на расстоянии в 4 ячейки от их пути следования. Если дорога не свободна, автомобили ждут.

7) Начинается новый временной шаг.

Разработанные алгоритмы реализованы авторами препринта в комплексе программ САМ-2D.

Примеры тестовых расчетов

T-образный управляемый перекресток

На рис. 9 представлены три фазы световорного цикла.

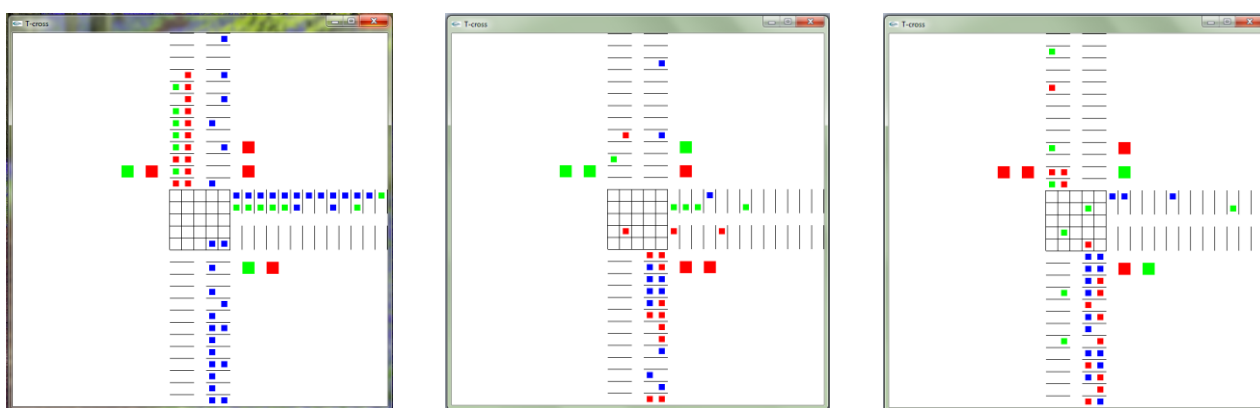


Рис. 9. Результаты моделирования движения на T-образном перекрестке.
Три фазы работы светофоров

Автомобили, имеющие разные цели, окрашены в разные цвета. Синие автомобили поворачивают вверх, зеленые – вниз, красные – направо. Цикл светофора в данной задаче состоит из трех фаз, длительность которых можно менять в зависимости от задания. Светофор изображен в виде красных или зеленых прямоугольников. На дороге, где есть поворот направо и проезд прямо, правый прямоугольник обозначает «стрелку» направо, левый разрешает или запрещает движение прямо. На дороге, где есть проезд прямо и поворот налево, левая по ходу движения секция обозначает «стрелку» налево, правая отвечает за движение прямо. Наконец, на дороге, где есть поворот направо и поворот налево, правый и левый прямоугольники отвечают за эти повороты соответственно.

Четырехсторонний управляемый перекресток

На рис. 10 представлены результаты моделирования движения автомобилей на четырехстороннем перекрестке со световорным режимом. Световорный цикл проходит четыре фазы, длительность которых, как обычно, можно менять. Автомобили, имеющие разные конечные цели, обозначены разными цветами: красные машины едут направо, голубые – налево, синие – вверх, зеленые – вниз. Светофоры представлены в виде прямоугольников

красного или зеленого цвета. Правый (если смотреть по ходу движения) прямоугольник разрешает или запрещает поворот направо («стрелка» направо), центральный отвечает за движение прямо, левый – за поворот налево («стрелка» налево). На дорогах, где поворот налево запрещен, есть только секции, отвечающие за движение прямо и направо.

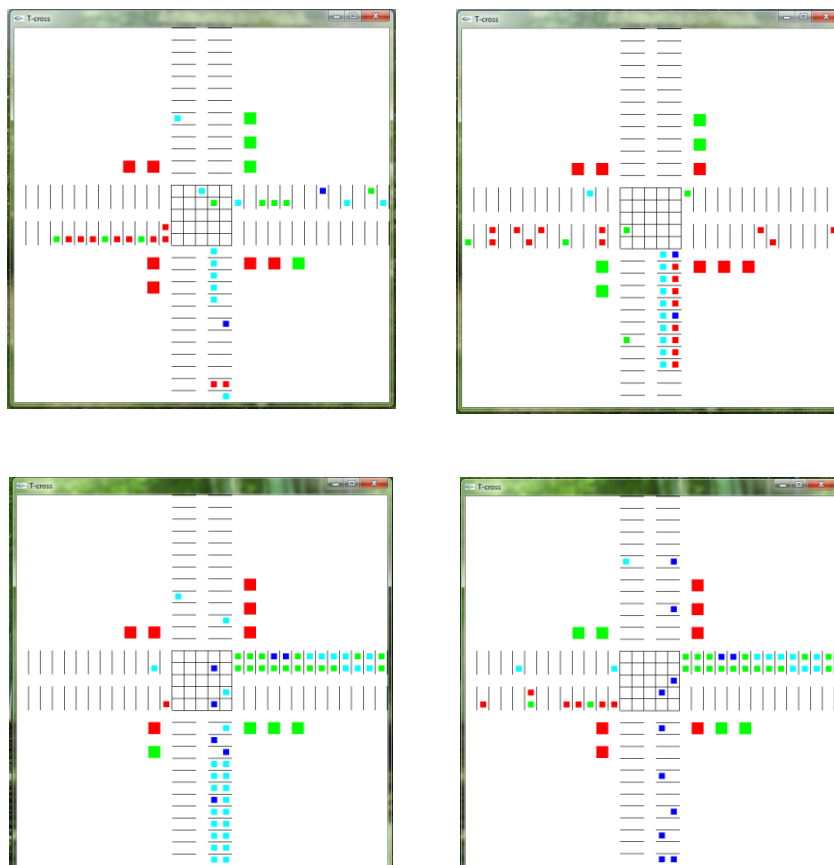


Рис. 10. Результаты моделирования движения на четырехстороннем перекрестке. Четыре фазы работы светофоров

Тесты показывают, что программный комплекс корректно моделирует работу светофора на перекрестках, автомобили движутся на зеленый сигнал светофора, останавливаются на красный и поворачивают в соответствии с заявленными целями.

Для тестирования работы программного комплекса был выполнен ряд расчетов, позволяющих определить пропускную способность четырехстороннего перекрестка со светофором при заданных значениях входящих потоков (достаточно больших, чтобы задача имела смысл) при различных длительностях фаз работы светофора и длинах светофорного цикла в целом. Под пропускной способностью понимается число автомобилей, пересекающих перекресток в каждом направлении за 10 минут. Решив эту задачу, можно выяснить, какое соотношение длин фаз (из рассмотренных) обеспечивает максимальную пропускную способность.

Для каждого цикла было проведено по 10 вычислительных экспериментов и получено соответствующее среднее число автомобилей N_{av} , преодолевших перекресток за 10 минут.

Расчеты для длины светофорного цикла 270 секунд.

- Цикл 90-90-45-45:	$N_{av}=3070.9$
- Цикл 45-45-90-90:	$N_{av}=3669.2$
- Цикл 90-30-90-60:	$N_{av}=3295.8$

Расчеты для длины светофорного цикла 225 секунд.

- Цикл 90-60-45-30:	$N_{av}=2952.1$
- Цикл 30-45-60-90:	$N_{av}=3760.1$
- Цикл 60-45-90-30:	$N_{av}=3394.1$

Из приведенных результатов расчета можно сделать вывод, что лучшим режимом работы светофора из представленных является режим, длительности фаз которого составляют 30-45-60-90 секунд.

Следовательно, при помощи программного комплекса можно производить поиск оптимального режима работы светофора, обеспечивающего максимальную пропускную способность перекрестка.

Заключение

В связи с появлением в последнее время высокопроизводительных вычислительных систем основной недостаток микроскопических систем – потребность в большой памяти для описания характеристик каждого отдельного автомобиля – перестает играть заметную роль, а такой тип моделей представляется наиболее перспективным даже для таких расчетов, как моделирование на сетях больших городов и мегаполисов.

Список литературы

- [1] Четверушкин Б. Н. Кинетические схемы и квазигазодинамическая система уравнений. – М.: МАКС Пресс, 2004. - 328 с.
- [2] Nagel, K.; Schreckenberg, M. A cellular automaton model for freeway traffic // J. Phys. I France. – 1992. – V. 2. – P. 2221-2229.
- [3] Трапезникова М.А., Фурманов И.Р., Чурбанова Н.Г., Липп Р. Моделирование многополосного движения автотранспорта на основе теории клеточных автоматов// Математическое Моделирование. – 2011. – Т. 23, № 6. – С. 133-146.

Оглавление

Введение	3
Макроскопическая модель	4
Пример тестового расчета с использованием макроскопической модели	6
Микроскопическая модель	8
Параметры микроскопической модели	9
Параметры движения АТС	10
Алгоритмы, положенные в основу программной реализации.....	11
Примеры тестовых расчетов	17
Заключение.....	19
Список литературы.....	19