



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский государственный технический  
университет  
имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)

---

Факультет Информатики и систем управления

Кафедра Теоретической информатики и компьютерных технологий

**РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
**К КУРСОВОЙ РАБОТЕ**  
**НА ТЕМУ:**

**Анализ автотранспортного потока с помощью  
клеточных автоматов**

Студент \_\_\_\_\_

(Группа)

\_\_\_\_\_  
(Подпись)

\_\_\_\_\_  
(И.О.Фамилия)

Руководитель курсового проекта

\_\_\_\_\_  
(Подпись)

\_\_\_\_\_  
(И.О.Фамилия)

Москва 2018

# Оглавление

Введение .....	3
Глава 1. Обзор предметной области.....	6
1.1 Современные подходы к моделированию транспортных потоков .....	6
1.2 Клеточные автоматы .....	9
Глава 2. Проектирование схемы решения, алгоритмизация.....	12
2.1 Переменные и обозначения .....	12
2.2 Модель Нагеля-Шрекенберга для однополосного движения	13
2.3 Модель «Медленного старта» .....	14
2.4 Модель «Стоп-сигнала» .....	16
2.4.1 Теория трех фаз транспортного потока.....	16
2.4.2 Правила модели «Стоп-сигнала» .....	18
2.5 Многополосное движение .....	19
2.6 Светофоры .....	21
2.7 Итоговые алгоритмы перестроения и передвижения .....	22
2.7.1 Перестроения .....	22
2.7.2 Передвижение.....	23
Глава 3. Программная реализация модели .....	26
Глава 4. Тестирование .....	27
Заключение.....	32
Список литературы.....	34

## Введение

Современный этап развития компьютерного моделирования сложных систем сопровождается все увеличивающимися возможностями аппаратных и программных средств вычислительной техники, что позволяет реализовывать алгоритмы, требующие больших вычислительных мощностей. К таким алгоритмам относятся алгоритмы на основе теории клеточных автоматов, позволяющие моделировать технические, социальные, экономические, биологические и другие объекты.

Нашли своё применение клеточные автоматы и в качестве концептуальных и практических моделей пространственно распределенных динамических систем, в том числе для моделирования автотранспортных потоков.

Теория транспортных потоков изучает процесс движения потоков транспортных средств по магистралям и построение улично-дорожных сетей, обеспечивающих эффективное сообщение с минимальным числом заторных ситуаций. Интенсивное развитие автомобильной промышленности и автомобилизация, наблюдаемые на протяжении последних десятилетий, обеспечили решение проблем транспортировки грузов и пассажиров. Однако положительная динамика роста автопарка с каждым годом ставит вопрос управления автотранспортными потоками всё более остро, особенно в условиях городов, поскольку их улично-дорожные сети, будучи спроектированными для более скромных потребностей, уже не способны удовлетворять спрос на передвижение.

Основными причинами, по которым движение по магистралям становится затруднённым, являются помехи, в роли которых выступают перекрёстки и пешеходные переходы. Нередко причиной заторов становятся дорожно-транспортные происшествия или ремонтные работы, частично или полностью блокирующие движение. Нужно упомянуть и характерное для

России в целом невысокое качество улично-дорожной сети, которое часто влечёт за собой вынужденное снижение скорости передвижения. Таким образом, ввиду несоответствия пропускной способности дорог потребностям их пользователей образуются пробки, для преодоления которых часто необходимо ожидать в очереди длительное время.

Для поиска эффективных стратегий управления транспортными потоками в мегаполисе, оптимальных решений по проектированию улично-дорожной сети и организации дорожного движения необходимо учитывать широкий спектр характеристик транспортного потока, закономерности влияния внешних и внутренних факторов на динамические характеристики транспортного потока. Ввиду изменчивости транспортной системы, её зависимости от случайных факторов, непредсказуемости поведения водителей, задача оптимизации решается с помощью моделирования.

В представленной курсовой работе описывается разработанная на основе теории клеточных автоматов модель автотранспортного потока, способная адекватно представлять ситуацию на дороге как в оперативном режиме, так и для целей прогнозирования.

Для разработки модели потребовалось решить следующие задачи:

1. Изучить теорию клеточных автоматов с имеющимися практическими реализациями.
2. Разработать модель дорожного движения, учитывающую структуру потока автотранспорта.
3. Разработать программный инструментарий для моделирования потоков автомашин.
4. Провести натурное обследование структуры и интенсивности автотранспортных потоков. Провести калибровку модели.
5. Осуществить проверку адекватности модели на основе данных опытных наблюдений.

В первом разделе проведены обзор и анализ предметной области моделирования дорожного движения средствами клеточных автоматов.

Второй раздел содержит описание микроскопической модели дорожного движения, основанной на стохастическом однополосном и многополосном транспортном клеточном автомате с функциями медленного старта и стоп-сигнала. Приведено формальное математическое описание модели.

В третьем разделе представлена программная реализация модели транспортного потока на основе клеточного автомата.

В четвертом разделе проведено тестирование модели на различных ситуациях, показана адекватность разработанной модели.

Целью данной работы является моделирование автотранспортного потока на основе исследования свойств клеточных автоматов, а так же анализ зависимости плотности потока от различных факторов, используя программную реализацию.

# Глава 1. Обзор предметной области

## 1.1 Современные подходы к моделированию транспортных потоков

Одним из путей решения проблемы разгрузки улично-дорожной сети является организация координированного светофорного регулирования с адаптивными схемами, способными к динамическому изменению в соответствии со сложившейся ситуацией. Такое регулирование может быть достигнуто на основе оперативных данных о численности и структуре транспортного потока, для получения которых необходимо использовать специальные программно-технические средства. При этом отражение оперативной ситуации с помощью подобных систем в масштабе города сопряжено с необходимостью охвата устройствами наблюдения всех перекрёстков и магистралей, что не всегда возможно и экономически оправдано. Также нередко возникает потребность в определении оптимального по времени маршрута передвижения при заданных условиях (плотности движения, светофорах и т.п.), например для транспорта служб экстренного реагирования. Эти задачи можно решить, воспользовавшись средствами моделирования.

Процесс моделирования транспортных потоков позволяет получить информацию, которая помогает принимать решение о дальнейшем развитии и управлении транспортной системой. В частности, моделирование позволяет определить потребности в постройке новых или расширении старых дорог, транспортных систем и терминалов, размещении новых светофоров и дорожных знаков или изменении расположения уже имеющихся. Грамотное планирование развития дорожной сети на основе полученных данных позволяет снизить нагрузку на транспортную сеть, избежать пробок и уменьшить среднее время в пути для водителей. Существует ряд проектов, направленных не только

на моделирование транспортных потоков, но и на предсказание возможных ситуаций на дороге и минимизацию нагрузок на транспортную сеть [1].

На сегодняшний день существует несколько подходов к моделированию движения автомобильного транспорта, которые можно объединить в следующие группы [2]:

1. Модели-аналоги, или макроскопические модели, в которых движение транспортного средства уподобляется какому-либо физическому потоку (гидро- и газодинамические модели).
2. Модели следования за лидером, или микроскопические, допускают предположение о наличии связи между перемещением ведомого и ведущего автомобилей. По мере развития теории в моделях этой группы учитывалось время реакции водителей, исследовалось движение на многополосных дорогах, изучалась устойчивость движения.
3. Вероятностные модели рассматривают транспортный поток как результат взаимодействия транспортных средств на элементах транспортной сети. В связи с жёстким характером ограничений сети и массовым характером движения в транспортном потоке складываются отчётливые закономерности формирования очередей, интервалов, загрузок по полосам дороги и т.п. Эти закономерности носят стохастический характер.

Исследование и моделирование транспортных потоков с помощью микро- и макромоделей позволяет определить объем загрузки и интенсивность потоков [3]. Современные тенденции в этой области направлены на создание специализированных информационных систем, управляющих конкретными городскими регионами и учитывающих его специфику. В мировой практике для решения подобных проблем применяются методы математического моделирования различной сложности и создаются компьютерные стенды, демонстрирующие полученные решения на макетах реальных дорог и перекрестков. Специализированные информационные системы современных городских мегаполисов способны, например, решать такие задачи: оценивать

интенсивность потоков транспорта на магистралях и управлять скоростью движения с учетом времени суток, погодных условий и времен года; оценивать экологическую обстановку в районе управления и давая рекомендации по ее улучшению. Построение подобных информационно-управляющих систем требует разработки соответствующих аналитических и программных моделей для оценки принимаемых решений.

В данной работе тщательно была рассмотрена вторая группа моделирования автотранспортного потока. В нее входят такие методы моделирования как:

1. Модель следования за лидером. В первых вариантах модели следования за лидером предполагалось, что каждый водитель изменяет свою скорость в соответствии с изменением скорости впереди идущего автомобиля. К недостаткам данной модели можно отнести то, что она не описывает возникновение заторов, ударных волн и свойств неустойчивости. Помимо этого, динамика одиночного автомобиля также является некорректной. В модели следования за лидером в случае отсутствия лидера ускорение равно нулю, в то время как разумным является предположение о стремлении водителя приблизить свою скорость к некоторой желаемой скорости.
2. Модель оптимальной скорости. В этой модели предполагается, что для каждого водителя существует “безопасная” скорость движения, зависящая от дистанции до лидера. Модель оптимальной скорости очень чувствительна к конкретному выбору функциональной зависимости оптимальной скорости от дистанции. При больших значениях времени в модели начинают происходить столкновения автомобилей, в то время как при слишком малых значениях возникают нереалистично большие ускорения.
3. Модель разумного водителя. Класс микроскопических моделей, объединяющий лучшие черты выше описанных моделей. Эксперименты с использованием данной модели показали реалистичное поведение,



воспроизведение основных наблюдаемых свойств транспортного потока и устойчивость свойств модели к вариациям параметров.

4. Клеточные автоматы. Дискретная модель, включающая регулярную решетку ячеек, каждая из которых может находиться в одном из конечного множества состояний в соответствии с набором правил, зависящих от состояний соседних ячеек. Правила применяются итеративно до тех пор, пока это необходимо. Как отмечают исследователи, для клеточных автоматов характерны высокая вычислительная скорость и эффективность.

В представленной курсовой работе предстояло более глубокое исследование именно клеточных автоматов, так как в последнее время они приобрели широкое распространение в моделировании автотранспортных потоков [4]. С помощью расширения диапазона соседних клеток, влияющих на переход автомата в новое состояние, были получены модели, имитирующие реалистичное поведение транспортного потока [5].

---

## 1.2 Клеточные автоматы

Теория клеточных автоматов зародилась в середине XX века в трудах нескольких независимых учёных. Наиболее полно она проработана известным математиком Джоном фон Нейманом. Клеточные автоматы в простейшем виде представляют собой двумерную сетку произвольного размера, состоящую из ячеек. Состояние сетки (конфигурация) обновляется с течением времени, причём состояние каждой ячейки в следующий момент времени зависит от состояния ближайших её соседей – смежных ячеек – на текущей итерации. Количество возможных состояний ячейки конечно [6]. Обновление конфигурации происходит параллельно, в соответствии с определёнными для данной модели правилами.

Свойства клеточных автоматов:

1. Однородность системы. Ни одна область неотличима от другой по каким-либо особенностям правил. Впрочем, так как в практической реализации количество ячеек ограничено объемом памяти, то ячейки на краю области могут иметь отличающиеся правила из-за отсутствия некоторых соседей, либо иметь измененный шаблон соседства.
2. Локальность правил. Только клетки окрестности и сама клетка могут влиять на состояние клетки.
3. Конечность множества возможных состояний клетки. Данное условие необходимо, чтобы для получения нового состояния требовалось конечное число операций.
4. Одновременный переход в новое состояние для всех клеток. Значения во всех клетках меняются одновременно в конце очередной итерации, а не по мере вычисления. В противном случае от порядка вычислений зависит результат итерации.

Впрочем, для решения конкретных практических задач некоторые из свойств могут быть отброшены. В модели фон Неймана клетки составляют бесконечную прямоугольную решетку, у каждой клетки соседями считаются только непосредственно прилегающие клетки. Изменения состояний клеток происходят одновременно, и правила всех клеток одинаковы.

Математическое определение клеточного автомата по Нейману:

Двумерный клеточный автомат можно определить как множество конечных автоматов на плоскости, помеченных целочисленными координатами  $(i, j)$ , каждый из которых может находиться в одном из состояний  $\sigma_{i,j}$ :

$$\sigma_{i,j} \in \Sigma = \{0, 1, 2, \dots, k-1, k\}.$$

Изменение состояний автоматов происходит согласно правилу перехода

$$\sigma_{i,j}(t+1) = \phi(\sigma_{k,l}(t) | (k,l) \in N(i,j)),$$

где  $N(i, j)$  - некоторая окрестность точки  $(i, j)$ . Окрестность фон Неймана определяется как

$$N_N^1(i, j) = \{(k, l) \mid |i - k| + |j - l| \leq 1\}$$

Число всех возможных правил перехода определяется числом состояний  $\sigma$  и количеством соседей  $n$  и составляет

$$N_r = \sigma^{\sigma^n}$$

## Глава 2. Проектирование схемы решения, алгоритмизация

### 2.1 Переменные и обозначения

Пусть имеется массив  $L$ , состоящий из ячеек одинаковой длины  $l$ . Значение ширины ячеек обычно не принимается во внимание, поскольку существенно не влияет на эволюцию автомата и при этом вносит дополнительную сложность в правила обновления. Измерения массива задаются параметрами  $M$  и  $N$ , определяющими его высоту (количество полос движения) и длину (протяжённость дороги) соответственно. В любой момент времени каждая ячейка может быть либо пуста, либо занята транспортным средством:  $a_i \in A$ ;  $A = \{a_i | i \in [0, u]\}$ ;  $u \in \mathbb{N}$ .

Позиция автомобиля задаётся двумя переменными  $m_i$  и  $n_i$ , которые соответствуют полосе и порядковому номеру ячейки. Многополосный транспортный клеточный автомат представлен на рисунке 1.

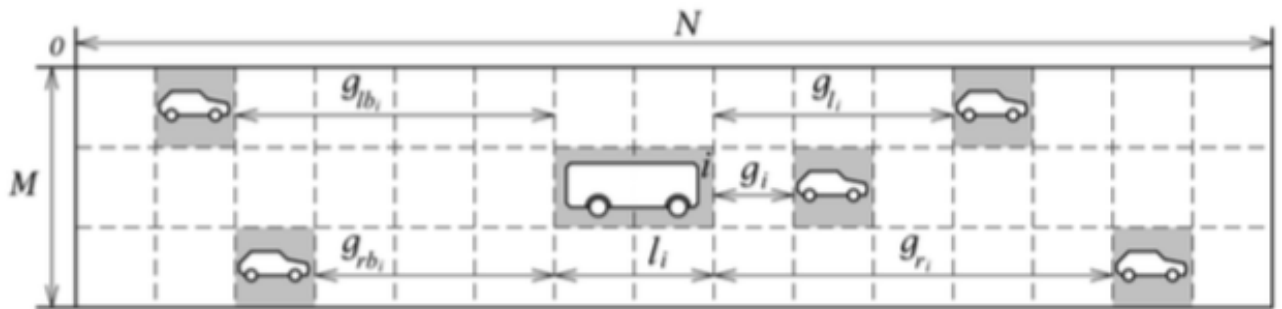


Рисунок 1. Многополосный транспортный клеточный [5]

$$g_i = n_{i+1} - l_i - n_i$$

$$g_{l_i} = n_l - l_l - n_i$$

$$g_{r_i} = n_r - l_r - n_i$$

$$g_{rb_i} = n_i - l_i - n_{rb}$$

$$g_{lb_i} = n_i - l_i - n_{lb}$$

Параметр  $g_i$  определяется как дистанция до ближайшего автомобиля на текущей полосе движения и влияет на новую скорость  $i$ -го автомобиля. Аналогично определяются параметры  $g_{l_i}$  и  $g_{r_i}$  для левой и правой полос соответственно (индексы  $l$  и  $r$  имеют одинаковый смысл для всех параметров). Параметры  $g_{rb_i}$  и  $g_{lb_i}$  характеризуют расстояние до автомобилей, идущих позади. Последние четыре параметра принимаются во внимание при смене полосы движения.

---

## 2.2 Модель Нагеля-Шрекенберга для однополосного движения

После использования концепции клеточных автоматов фон Нейманом для моделирования транспортных потоков активные разработки продолжались в работах Кая Нагеля и Майкла Шрекенберга. Модель, разработанная немецкими учёными, представляет собой развитие стохастического одномерного клеточного автомата, предназначенного для моделирования дорожного движения [7].

Формулировка исходной модели Нагеля–Шрекенберга для однополосного движения заключается в следующем: пусть имеется одномерная сетка, каждая ячейка которой может быть либо свободна, либо занята автомобилем.

Переменные  $n_i$  и  $v_i$  – координата и скорость  $i$ -го автомобиля соответственно;  $g_i = n_{i+1} - l_i - n_i$  – дистанция до лидирующего автомобиля;  $l_i$  – длина  $i$ -го автомобиля. Скорость может принимать одно из допустимых целочисленных значений  $v_i = 0, 1, 2, \dots, v_{\max}$ . На каждом временном шаге  $t$  состояние всех автомобилей в системе обновляется в соответствии со следующими правилами:

1. Ускорение – если  $v_i < v_{\max}$ , то скорость  $i$ -го автомобиля увеличивается на единицу; если  $v_i = v_{\max}$ , то скорость не изменяется:

$$v_i(t) = \min(v_i(t-1) + 1, v_{\max}).$$

2. Торможение – если новая скорость равна или больше расстояния до впереди идущего автомобиля, то значение скорости приравнивается к этому расстоянию:

$$v_i(t) = \min(v_i(t), g_i(t-1)).$$

3. Случайные возмущения – с заданной вероятностью  $p$  водитель уменьшает скорость:

$$\text{if } \xi(t) < p \text{ then } v_i(t) = \max(v_i(t) - 1, 0).$$

4. Движение – изменение положения автомобиля на сетке автомата в соответствии со вновь вычисленной скоростью:

$$n_i(t) = n_i(t-1) + v_i(t).$$

Первое правило отражает общее стремление всех водителей ехать с максимальной скоростью, второе – гарантирует отсутствие столкновений со впереди идущими автомобилями. Элемент стохастичности, учитывающий случайности в поведении водителей и прочие вероятностные факторы, вносится третьим правилом, где переменная  $\xi \in [0,1)$  – случайная величина, распределённая равномерно, а  $p$  – параметр, отвечающий за вероятность случайного замедления автомобиля. Четвёртое правило определяет количество ячеек, на которое продвинется автомобиль за одну итерацию.

---

## 2.3 Модель «Медленного старта»

Рассмотренная выше модель дорожного движения имеет недостаток – она не способна воспроизводить явление резкого спада пропускной способности

при переходе к фазе синхронизованного потока. Причина этого кроется в нестабильности поведения заторов, которая обусловлена слишком быстрым оттоком автомобилей. Для получения более реалистичной картины ситуации на дороге необходимо добиться, чтобы интенсивность оттока автомобилей из затора была меньше интенсивности притока. Это свойство может быть достигнуто путём введения задержки ускорения автомобиля с нулевой скоростью. Модели, включающие такие задержки, получили название моделей медленного старта.

В работе [8] предложена модель, включающая задержку автомобилей, находящихся в состоянии покоя. Основным мотивом к введению такого свойства является то, что обычный автомобиль, движущийся с высокой скоростью, может достаточно быстро остановиться, но, чтобы набрать прежнюю скорость, потребуется значительно больше времени. В модели Такаясу[8] машины начинают движение только после того, как движение начинает лидер и впереди образуется свободное пространство. Набор правил для модели представлен ниже:

1. Торможение:

$$\text{if } v_i(t-1) > g_i(t-1) \text{ then } v_i(t) = g_i(t-1)$$

2. Запаздывающее ускорение:

$$\text{if } v_i(t-1) = 0 \text{ and } g_i(t-1) \geq 2 \text{ then } v_i(t) = 1$$

3. Движение:

$$n_i(t) = n_i(t-1) + v_i(t)$$

Из правил следует, что автомобиль будет двигаться со скоростью 1 ячейка/итерацию до тех пор, пока не возникнет необходимость остановиться согласно правилу торможения. Возобновление движения возможно только при наличии впереди достаточного интервала в две или более ячейки. Таким образом, модель реализует запаздывающее ускорение, которое оказывает влияние только на машины с нулевой скоростью. Движение машин осуществляется по последнему правилу.

В дальнейшем модель была усовершенствована путём введения вероятности срабатывания правила медленного старта при наличии впереди интервала в одну ячейку и вероятности замедления, делающей возможными случайные остановки машин в потоке [9].

$$\begin{aligned} & \text{if } \xi(t) < p_{sts} \quad \text{and} \quad v_i(t-1) = 0 \quad \text{and} \quad g_i(t-1) \leq d_{sts} \\ & \text{then } v_i(t) = 0 \end{aligned}$$

Где  $p_{sts}$  - параметр, отвечающий за вероятность срабатывания правила медленного старта, а  $d_{sts}$  - расстояния между автомобилями, при котором действует правило медленного старта.

---

## 2.4 Модель «Стоп-сигнала»

Группа немецких учёных предложила модель дорожного движения, включающую эффект упреждения, реализованный посредством стоп-сигналов автомобилей и реакции водителей на них [10]. Целью модели является корректное воспроизведение трёх фаз транспортного потока, описанных в теории Бориса Кернера [11].

---

### 2.4.1 Теория трех фаз транспортного потока

Эта теория фокусируется главным образом на объяснении физики перехода от свободного к плотному потоку и возникающих в результате этого перехода пространственно-временных структурах в плотном транспортном



потоке на скоростных автомагистралях. Кернер описывает три фазы транспортного потока, в то время как классические теории, базирующиеся на фундаментальной диаграмме транспортного потока, рассматривают две фазы: свободный поток и и так называемый плотный поток. Согласно Кернеру, в плотном потоке выделяются две фазы, синхронизированный поток и широкий движущийся кластер машин (локальный движущийся затор).

В теории трёх фаз Кернера, машина ускоряется, когда расстояние  $g_i$  до машины впереди больше чем дистанция синхронизации скорости  $G$ , т.е. при  $g_i > G$  (обозначено словом "ускорение" на рисунке 2); машина тормозит, когда расстояние  $g_i$  меньше чем безопасное расстояние  $g_{safe}$ , т.е. при  $g_i < g_{safe}$  (обозначено словом "торможение" на рисунке 2).

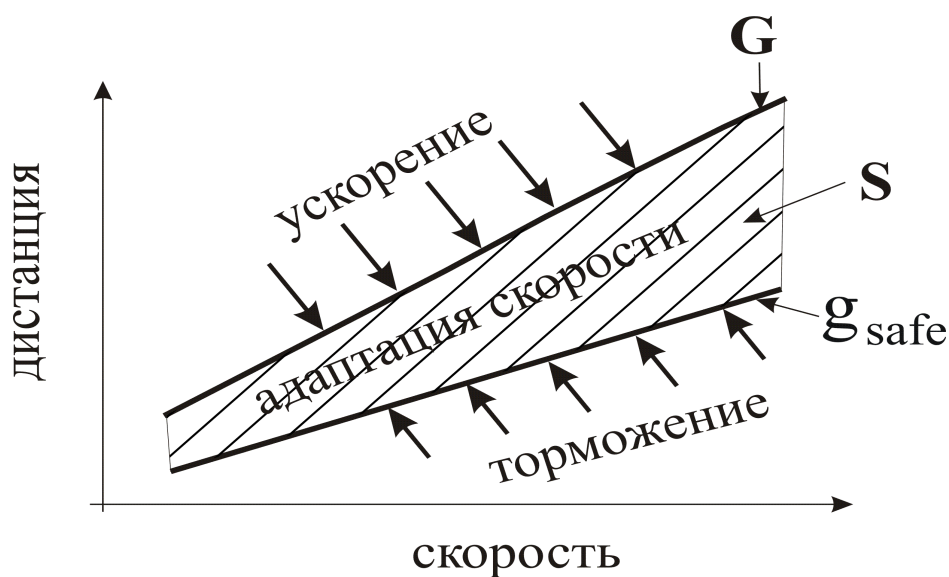


Рисунок 2. Объяснение свойств процесса следования машин одна за другой в теории трёх фаз Кернера [10]

Дистанция синхронизации скорости  $G$  представляет собой расстояние  $g_i$  до машины впереди, в пределах которого машина стремится адаптировать свою скорость к скорости машины впереди, не заботясь от том, каким точно является расстояние между машинами, до тех пор пока это расстояние не меньше безопасного  $g_{safe}$  (обозначено как "адаптация скорости" на рисунке 2). Таким

образом, в теории трёх фаз Кернера при следовании машин одна за другой расстояние  $g_i$  может быть любым в пределах определённого диапазона  $g_{safe} \leq g_i \leq G$ .

---

#### 2.4.2 Правила модели «Стоп-сигнала»

Модель включает следующие возможности: стохастические торможения; упреждение скорости, выраженное в стабильности потока автотранспорта, пребывающего в свободном режиме; способность к воспроизведению синхронизированного потока автомобилей. Последние два свойства имеют сходство с поведением большинства водителей в реальности, стремящихся к уравновешенному движению.

Данный подход основан на стратегии вождения, которая включает в себя три аспекта [12]:

1. На больших расстояниях автомобили движутся (помимо колебаний) с желаемой скоростью  $v_{max}$ .
2. На промежуточных расстояниях водители реагируют на изменение скорости следующего транспортного средства ниже по течению, т. е. на “стоп-сигналы”.
3. На малых расстояниях водители регулируют свою скорость таким образом, чтобы обеспечить безопасное вождение.

Эти требования включены в набор правил обновления для  $n$ -ой машины, характеризующиеся своей позиции  $x_n(t)$  и скорости  $v_n(t)$  в момент времени  $t$ .

$b_n$  - состояние стоп-сигнала (on(off)  $\longrightarrow b_n = 1(0)$ ),  $\xi(t)$

Правила обновления выглядят следующим образом:

1. Торможение:

if  $\xi(t) < p_{sa}$  and  $v_{i+1}(t-1) > 0$  and  $v_{i+1}(t-1) > 0$  and  $g_i(t-1) \leq d_{sa}$   
 and  $(b_{i+1}(t-1) = 1$  or  $v_{i+1}(t-1) < v_i(t-1))$ ,  
 then  $v_i(t) = v_{i+1}(t-1)$ ,  $b_i(t) = 1$

2. Рандомизация торможения:

if  $(rand() < p)$  then:  $v_i(t) = v_i(t-1) - 1$

3. Движение автомобиля:

$$x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1)$$

---

## 2.5 Многополосное движение

Однополосные модели идеально подходят для моделирования однородного по составу транспортного потока, что подразумевает одинаковые технические характеристики и соответственно скорости автомобилей. Введение разных по скоростным характеристикам автомашин на однополосную дорогу с течением времени приведёт к формированию колонн, во главе которых будут двигаться наиболее медленные транспортные средства. В то же время дорожному движению свойственна гетерогенность потока, равно как и наличие на большинстве дорог более одной полосы движения. Поэтому логичным развитием однополосных моделей дорожного движения стали многополосные модели с возможностью перестроений [13].

Обновление в таких моделях проводится в два этапа:

1. Определяются необходимость и возможность смены полосы для каждого автомобиля. Если манёвр необходим и осуществим, происходит перемещение машины вбок. Перемещение может производиться как влево, так и вправо в зависимости от ширины дороги и текущей полосы движения.

2. На каждой полосе проводится независимое обновление в соответствии с правилами для однополосной модели.

Этапы проводятся последовательно, и конфигурация, полученная после процедуры смены полос, используется при вычислении новых скоростей. Данная модель является сравнительно более сложной, смена полосы в общем случае может быть осуществлена при выполнении следующих условий:

$$g_i(t-1) < d(t-1)$$

$$g_{o_i}(t-1) < d_o(t-1)$$

$$g_{ob_i}(t-1) < d_{ob}(t-1)$$

$$\xi(t) < p_c$$

Здесь переменные  $g_{o_i}$  и  $g_{ob_i}$  соответствуют расстоянию до автомобилей впереди и позади на смежной полосе. Параметры  $d_o$  и  $d_{ob}$  задают расстояния до других машин впереди и позади, при наличии которых принимается решение о смене полосы. Условия обеспечивают безопасность перестроения: первое (позволяет избежать столкновений со впереди идущими машинами, следующие два – с машинами на смежных полосах. Наконец, с вероятностью  $p_c$  водитель принимает окончательное решение о смене полосы. Таким образом, в модели появляются дополнительные параметры для соседней полосы – дистанция до предшественника и до лидера.

В многополосных моделях, включающих три и более полосы, применение набора правил для двухполосной модели приводит к столкновениям ввиду т.н. конфликта распределения. Коллизии могут возникнуть, когда два автомобиля передвигаются по крайним полосам трёхполосной дороги, имеют одну скорость и координату  $n$  и синхронно принимают решение о перестроении на свободную среднюю полосу.

Избежать подобных столкновений можно двумя способами:

- предоставлением приоритета одному из претендующих автомобилей;

- введением очередности правых и левых перестроений, например, разрешая смену полосы на правую только по чётным итерациям, а на левую – по нечётным.

Кроме того, отмечаются ситуации, при которых автомобили на смежных полосах передвигаются с одинаковой скоростью, при этом блокируя более быстрые машины, идущие позади, и порождая колонны на двух и более полосах.

---

## 2.6 Светофоры

Регулирование потоков автотранспорта на перегонах и пересечениях одного уровня осуществляется с помощью автомобильных светофоров. Такой светофор представляет собой устройство оптической сигнализации, имеющее три индикатора разных цветов: красный, жёлтый (оранжевый) и зелёный. В данной модели используется упрощенный вариант светофора, имеющий два индикатора: красный и зеленый.

Состояние светофора продолжается в течение заданного промежутка времени  $t_{ls}$ . При появлении светофора в пределах дистанции  $d_{ls} = v_{\max} + 1$  водитель считывает текущий сигнал. Расстояние до ближайшего светофора определяется переменной  $g_{ls}$ .

Реакция на каждый сигнал приведена ниже:

### 1. Зеленый:

В данном случае автомобили двигаются по правилам передвижения, которые были описаны выше.

### 2. Красный:

$$\text{if } LS = R \text{ and } g_i(t-1) > g_{ls} \text{ and } g_{ls} > 0 \text{ and } v_i(t) \geq 0$$

$$\text{then } v_i(t) = 1$$

$$\begin{aligned} & \text{if } LS = R \text{ and } g_i(t-1) > g_{ls} \text{ and } g_{ls} = 0 \text{ and } v_i(t) \geq 1 \\ & \text{then } v_i(t) = 0 \quad b_i(t) = 1 \end{aligned}$$

Правило 2 определяет реакцию водителей на запрещающий сигнал светофора. Так, если между машиной и светофором имеется свободное пространство, водитель начинает или продолжает движение с минимальной скоростью 1 ячейка/итерацию. Если расстояние до светофора сократилось до нуля, водитель останавливается.

---

## 2.7 Итоговые алгоритмы перестроения и передвижения

---

### 2.7.1 Перестроения

---

Необходимость смены полосы на левую *CLN* или правую *CRN* можно записать в виде следующего условия:

Если впереди на более низкой скорости движется автомобиль:

$$\begin{aligned} & \text{if } g_i(t-1) < v_i(t-1) \text{ and } v_i(t-1) > v_{i+1}(t-1) \\ & \text{then } CLN1 = T, \quad CRN1 = T \end{aligned}$$

Манёвр смены полосы на левую *CLO* или правую *CRO* возможен только при выполнении следующих условий:

1. На соседней полосе впереди на расстоянии, большем  $g_i$ , нет других машин:

$$\text{if } g_i(t-1) > g_i(t-1) \text{ then } CLO1 = T$$

$$\text{if } g_r(t-1) > g_i(t-1) \text{ then } CRO1 = T$$

2. На соседней полосе позади на расстоянии  $v_{\max} + 1$  отсутствует другая машина, которой текущий автомобиль может помешать при перестроении. Единица прибавляется для исключения столкновений в результате применения правила “превышения скорости” (определение приведено в следующем пункте):

$$\text{if } q_{rl_i}(t-1) > v_{\max} + 1 \text{ then } CLO2 = T$$

$$\text{if } q_{rb_i}(t-1) > v_{\max} + 1 \text{ then } CRO2 = T$$

Если все условия необходимости и возможности смены полосы выполнены, происходит перестроение влево или вправо:

1. Перестроение влево:

$$\text{if } \xi(t) < p_c \text{ and } t \bmod 2 = 0$$

$$\text{then } m_i(t) = m_i(t-1) + 1$$

2. Перестроение вправо:

$$\text{if } \xi(t) < p_c \text{ and } t \bmod 2 > 0$$

$$\text{then } m_i(t) = m_i(t-1) - 1$$

Манёвр перестроения происходит с параметром  $p_c$ , отвечающим за вероятность смены полосы. Бинарный оператор  $\bmod$  выделяет остаток от деления своих аргументов и применяется для разделения левых и правых перестроений – это исключает появление “конфликта распределения”.

---

### 2.7.2 Передвижение

Передвижение машин по сетке автомата производится по классическим правилам однополосной модели. Следует принять во внимание возможности, представленные в одно- и многополосных моделях с правилом медленного

старта и стоп-сигнала, поскольку эти дополнения позволяют более адекватно отразить динамику потока автотранспорта.

Определение новой скорости и перемещение автомобилей происходит по следующим правилам:

1. Ускорение:

$$\begin{aligned} & \text{if } \xi(t) < p_{sts} \quad \text{and} \quad v_i(t-1) = 0 \quad \text{and} \quad g_i(t-1) \leq d_{sts} \\ & \text{then } v_i(t) = 0 \\ & \text{else } v_i(t) = v_i(t-1) + 1 \end{aligned}$$

2. Торможение:

$$\begin{aligned} & \text{if } \xi(t) < p_{sa} \quad \text{and} \quad v_{i+1}(t-1) > 0 \quad \text{and} \quad v_{i+1}(t-1) > 0 \quad \text{and} \quad g_i(t-1) \leq d_{sa} \\ & \text{and} \quad (b_{i+1}(t-1) = 1 \quad \text{or} \quad v_{i+1}(t-1) < v_i(t-1)), \\ & \text{then } v_i(t) = v_{i+1}(t-1), \quad b_i(t) = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{if } LS = R \quad \text{and} \quad g_i(t-1) > g_{ls} \quad \text{and} \quad g_{ls} > 0 \quad \text{and} \quad v_i(t) \geq 0 \\ & \text{then } v_i(t) = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{if } LS = R \quad \text{and} \quad g_i(t-1) > g_{ls} \quad \text{and} \quad g_{ls} = 0 \quad \text{and} \quad v_i(t) \geq 1 \\ & \text{then } v_i(t) = 0 \quad b_i(t) = 1 \end{aligned}$$

3. Случайное замедление:

$$\text{if } \xi(t) < p \quad \text{then } v_i(t) = v_i(t-1) - 1$$

4. Движение:

$$n_i(t) = n_i(t-1) + v_i(t)$$

Выражение 1 задействует правило медленного старта с вероятностью  $p_{sts}$ .



С помощью выражения 2 включается правило упреждающего изменения скорости. Также учтен случай торможения и последующей остановки перед красным сигналом светофора.

Согласно правилу 3, с вероятностью  $p$  автомобиль уменьшает свою скорость на единицу, что вносит случайный элемент в поведение водителей.

Наконец, правило 5 перемещает автомобиль на количество ячеек, равное  $v_i$ .

## Глава 3. Программная реализация модели

Для реализации поставленной задачи использовался язык программирования Java [14] с установленной библиотекой LWJGL [15] для визуализации результата моделирования автотранспортного потока, дающей возможность для работы с OpenGL и библиотекой GLFW для работы с окном в Java.

В процессе реализации было создано 5 отдельных классов, помимо главного Main класса и один интерфейс:

- 1) Car - класс, который реализует автомобиль со всеми правилами клеточных автоматов, которые были описаны в главе 2.
- 2) Grid - класс, реализующий сетку клеточного автомата.
- 3) Cell - клетка в сетке клеточного автомата.
- 4) Road - интерфейс, с помощью которого можно создать одно- или многополосную дорогу.
- 5) TrafficLight - светофор, позволяющий регулировать транспортный поток.
- 6) Drawer - класс, который используется для визуализации транспортного потока.

Программа работает следующим образом:

1. Создаётся объект класса Drawer, в котором можно менять поля ширины, высоты окна, размера клетки клеточного автомата и количество полос однонаправленной дороги. В конструкторе определяются основные классы приложения, такие как Road и Grid.
2. В цикле отрисовки вызывается метод генерации потока машин, параметр которого определяет скорость создания новых автомобилей. И вызывается метод изменения состояния клеточного автомата.
3. По итогу открывается окно отрисовки, в котором можно видеть изменение автотранспортного потока.

## Глава 4. Тестирование

Тестирование работы клеточного автомата не требует моделирования большой дорожной сети, поэтому вполне будет достаточно фрагмента односторонней трехполосной магистрали. Из всех успешно протестированных правил, описанных в главе 2, наиболее интересен известный случай коллизии «конфликта распределений», то есть когда из крайних полос дороги два автомобиля должны перестроить на среднюю. Так как был введен бинарный оператор `mod` в правило смены полосы, который в свою очередь служит своеобразным разделителем левых и правых перестроений, данная ошибка была успешно устранена.

На рисунке 3 продемонстрирован пример «конфликта распределений». Синяя и красная машины имеют скорость значительно меньше нежели зеленая и желтая. У двух последних полностью работает правило смены полосы, так как на средней полосе нет машин, которые могут помешать осуществить перестроение. Это и называется конфликтом распределений.

На рисунке 4 показана следующая итерация клеточного автомата, на которой виден правильный исход этой ситуации.

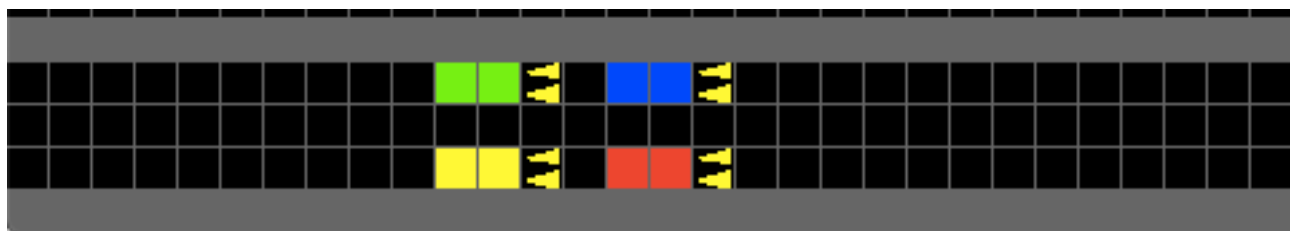


Рисунок 3. Пример «конфликта распределений»

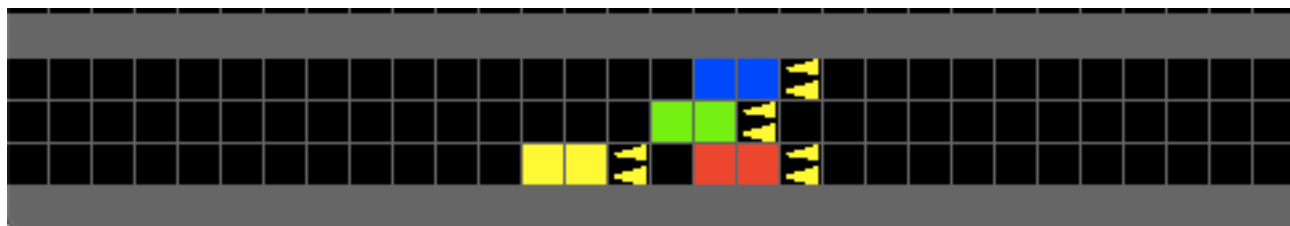
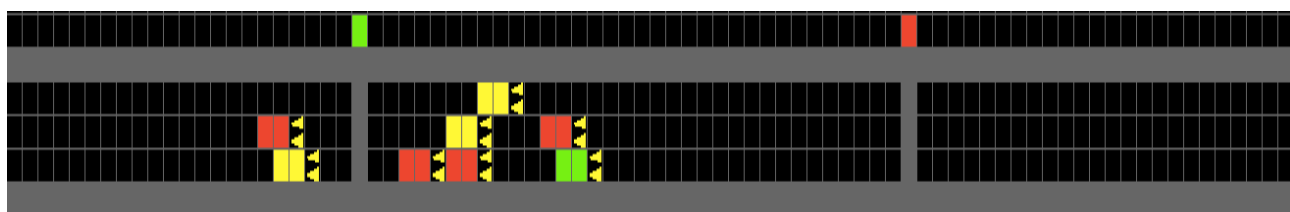


Рисунок 4. Правильное решение «конфликта распределений»

Следует отметить, что внеся параметры стохастичности, корректность работы клеточного автомата проверять затруднительно, однако именно в этом случае модель наиболее соответствует реальной жизни, в которой присутствует человеческий фактор. Значения параметров были определены в соответствии с работой Долгушина и Мызниковой [5], в которой было проведено натурное обследование структуры и динамики автотранспортных потоков методом видеонаблюдения. В результате накоплены данные о количественном и типовом составе потока машин и средней скорости их передвижения в различное время суток, послужившие основой для калибровки модели и дальнейшего использования в численных экспериментах. На основе натурного обследования структуры и интенсивности генерируемых транспортных потоков можно сказать, что данная модель адекватна.

Следующий этап тестирования заключается в анализе зависимости плотности транспортного потока от различных факторов.

Как упоминалось ранее, тестирование проводилось на фрагменте трехполосной магистрали. Также были введены два светофора, дабы рассмотреть разные случаи регулирования транспортного потока сигналами светофора. На рисунке 5 показан пример тестируемого фрагмента дороги (серыми горизонтальными линиями обозначены обочины дороги, серыми вертикальными стоп-линии, над стоп-линиями изображены сигналы светофоров).



*Рисунок 5. Тестируемый фрагмент магистрали*

Оценка плотности потока на магистралях является технически сложной задачей ввиду необходимости постоянного контроля количества транспортных

средств, передвигающихся по всему наблюдаемому участку. Альтернативным способом оценки плотности  $k$  является использование соотношения

$$k = \frac{q}{v}$$

где  $q$  – интенсивность движения;  $v$  – скорость потока.

Для определения основных параметров использовался наиболее простой и в то же время достаточно надёжный метод, включающий следующие шаги:

1. На заданном участке дороги выбиралась область, ограниченная двумя сечениями, А и Б (начало тестируемой дороги и конец).
2. Между сечениями измерялось расстояние (80 клеток).
3. Для каждого автомобиля измерялось время  $\Delta t$  прохождения участка АБ.

Среднее значение скорости  $v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$ .

Интенсивность движения  $q = \frac{N}{T}$ , где  $T$  - все время выполнения теста.

Первым делом следует проанализировать зависимость плотности потока от интервала между генерациями машин или по-другому интенсивность движения. В момент отрисовки проводится проверка числа итераций по определённому модулю ( $t \bmod j = 0$ ), то есть каждые  $j$  итераций происходит генерация новых автомобилей. Параметр  $j$  напрямую зависит от интенсивности движения транспортного потока, чем меньше  $j$ , тем больше  $q$ .

А чем больше  $q$ , больше и  $k$ . Результаты тестирования представлены в таблице

1. Светофоры в данном тесте работали в одинаковом режиме ( $i(sl1)$  - интервал действия сигнала первого светофора,  $i(sl2)$  - интервал действия сигнала второго светофора).

Входные данные	Интенсивность движения (q)	Средняя скорость машин (v)	Плотность потока (k)
t = 1000 j = 2 i(sl1) = 10 i(sl2) = 10	0,988000	3,670918	0,269142
t = 1000 j = 4 i(sl1) = 10 i(sl2) = 10	0,509000	3,995776	0,127385
t = 1000 j = 8 i(sl1) = 10 i(sl2) = 10	0,244000	4,641958	0,052564

Таблица 1. Зависимость клеточного потока от интенсивности движения

Следующим фактором от которого может зависеть плотность транспортного потока это интервал работы светового сигнала светофора. В данном тесте интенсивность движения была одной и той же, интервал действия сигнала первого светофора так же не менялся. Менялся только интервал действия сигнала второго светофора. Результаты тестирования приведены в таблице 2.

Входные данные	Интенсивность движения (q)	Средняя скорость машин (v)	Плотность потока (k)
t = 1000 j = 2 i(sl1) = 10 i(sl2) = 10	0,988000	3,670918	0,269142
t = 1000 j = 2 i(sl1) = 10 i(sl2) = 20	1,000000	2,450036	0,408157
t = 1000 j = 2 i(sl1) = 10 i(sl2) = 30	0,980000	2,923926	0,335166
t = 1000 j = 2 i(sl1) = 10 i(sl2) = 40	0,944000	1,929147	0,489335
t = 1000 j = 2 i(sl1) = 10 i(sl2) = 50	0,944000	2,171451	0,434732

Таблица 2. Зависимость клеточного потока от интервала действия сигнала светофора

По результатам тестирования очень тяжело выявить тенденцию плотности потока. Но можно сказать точно, что зависимость есть и, предоставив данную информацию эксперту в предметной области, он сможет оптимизировать плотность потока, варьируя значениями интервалов действия сигналов светофора.

## Заключение

В рамках данной курсовой работы была создана модель движения автотранспорта, в основу которой положена концепция стохастических клеточных автоматов. Предложенная модель относится к классу имитационных, поскольку с помощью набора правил описывает процессы движения машин так, как они происходят в действительности. Модель также включает правила “Медленного старта” и “Стоп-сигнала”, позволяющее более адекватно отражать скорость движения потока машин.

Поскольку для проведения имитационного моделирования целесообразно использование ресурсов вычислительной техники, был разработан программный инструментарий, предоставляющий набор классов для решения широкого круга задач.

Проведено тестирование корректной работы клеточного автомата, проанализированы результаты тестирования зависимости плотности транспортного потока от различных факторов.

Рассмотренные в данной статье модели транспортных потоков на основе концепции клеточных автоматов показывают интересные и реалистичные результаты. Ограничиваемый лишь воображением исследователя набор возможных правил и состояний клеточного автомата предоставляет широкие возможности в моделировании сложного динамического процесса дорожного движения.

Например, при создании модели сети городского движения представляется целесообразным в дальнейшем ввести “битые” ячейки, создающие эффект повреждённого дорожного покрытия и заставляющие водителей снижать скорость. Таким образом, можно создать ещё более реалистичную модель движения в городских условиях, которая может быть использована для исследования заторовых ситуаций и получения данных о влиянии качества дорожного покрытия на формирование потоков транспорта.



Это, в свою очередь, может оказаться полезным при определении минимальных по временным затратам маршрутов движения.

Кроме того, можно использовать модель для выявления негативного влияния автотранспорта на состояние воздуха, добавляя характеристики загрязнения для каждого автомобиля и вычисляя общий объем загрязнения на участках дорожной сети.

## Список литературы

- [1] Кравченко П.С., Омарова Г.А. Микроскопические математические модели транспортных потоков. Аналитический обзор // Проблемы информатики. 2014. №1. С. 71-78
- [2] Семёнов В.В. Математическое моделирование транспортных потоков мегаполиса / Семёнов В.В. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2004. – 44 с.
- [3] Гасников А.В. и др. Введение в математическое моделирование транспортных потоков. Москва: МФТИ, 2010.
- [4] Долгушин Д. Ю. Многофакторная модель дорожного движения города на основе клеточных автоматов / Д. Ю. Долгушин, Т. А. Мызникова // Материалы 62-й научно-технической конференции СибАДИ. – Омск: СибАДИ, 2008. – С. 109 – 113.
- [5] Долгушин Д. Ю. Моделирование транспортных потоков города на основе клеточных автоматов / Д. Ю. Долгушин, Т. А. Мызникова // Вестник СибАДИ. – Омск: СибАДИ, 2008. – No 2 (8). – С. 18–23.
- [6] Нейман Джон фон. Теория самовоспроизводящихся автоматов. Закончено и отред. [предисловие и введ., с. 40-48, написаны] А.В. Бёрксом, Пер. с англ. В.Л. Стефанюка. Под ред. В.И. Варшавского. М. “Мир”, 1971. – 384 с.
- [7] Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automation model for freeway traffic // J. Phys. I France. – 1992. – Vol. 2. – P. 2221-2229.
- [8] Takayasu M., Takayasu H. 1/f noise in a traffic model // Fractals. 1993. Vol. 4, no. 1. Pp. 860–866.
- [9] Schadschneider A., Schreckenberg M. Traffic flow models with “slow-to- start” rules // Ann. Phys. 1997. Vol. 7, no. 6. Pp. 541–551.
- [10] Knospe W., Santen L., Schadschneider A., Schreckenberg M. Towards a realistic microscopic description of highway traffic // J. Phys. A: Math. Gen. 33. 2000. Pp. 477–485.
- [11] Kerner B. S. Three-phase traffic theory and highway capacity. [Электронный ресурс] // URL: <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0211684v3>.

- [12] Shinkarev A.A. Traffic Flow Model Based on Cellular Automation with Adaptive Deceleration. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics, 2015, vol. 16, no. 1, pp. 160-164. DOI: 10.14529/ctcr160115
- [13] Rickert M., Nagel K., Schreckenberg M., Latour A. Two lane traffic simulations using cellular УДК 625.746.533 automata // Physica A, Volume 231, Number 4, 1 October 1996 , P. 534-550(17) .
- [14] Документация языка Java [Электронный ресурс] // URL: <https://docs.oracle.com/javase/8/docs/>.
- [15] Документация библиотеки LWJGL [Электронный ресурс] // URL: <https://javadoc.lwjgl.org>.