



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

Чечина А.А.

Новые алгоритмы  
перестроения автомобилей  
для микроскопической  
модели транспортных  
потоков на основе теории  
клеточных автоматов

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Чечина А.А. Новые алгоритмы перестроения автомобилей для микроскопической модели транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2017. № 136. 14 с. doi:[10.20948/prepr-2017-136](https://doi.org/10.20948/prepr-2017-136)  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-136>

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

**А.А. Чечина**

**Новые алгоритмы перестроения автомобилей  
для микроскопической модели  
транспортных потоков  
на основе теории клеточных автоматов**

**Москва — 2017**

*А.А. Чечина*

**Новые алгоритмы перестроения автомобилей для микроскопической модели транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов**

В препринте приводится описание нового алгоритма «вежливый водитель» для математической модели транспортных потоков, основанной на теории клеточных автоматов. Алгоритм позволяет отображать сотрудничество водителей при проезде препятствия, например сужения дорог. Так, например, водители из свободной полосы могут при определенных обстоятельствах пропускать водителей из полосы с препятствием. Также описаны различные стратегии принятия решения о перестроении.

Приведены результаты тестовых расчетов для различных типов препятствий, а также сравнение с тестовыми расчетами, выполненными без данного алгоритма.

**Ключевые слова:** автотранспортные потоки, микроскопический подход, клеточные автоматы

*А.А. Chechina*

**New lane changing algorithms for microscopic model of traffic flows based on cellular automata theory**

New “cooperative driver” algorithm for mathematical model of traffic flows, based on cellular automata theory, is presented in the preprint. Algorithm allows to depict cooperation between drivers, if an obstacle, such as, for instance, a road bottleneck, appears on the road. In this case, under certain circumstances, drivers from the free lane can give way to the drivers from the lane with an obstacle. Different decision-making strategies about changing lanes are shown.

Computational results of test calculations for different types of obstacles, as well as the comparison with computations carried out without “cooperative driver” algorithm, are adduced.

**Key words:** vehicular traffic flows, microscopic approach, cellular automata.

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

## Введение

В транспортном моделировании наиболее популярными являются два подхода: макроскопический, когда мы имеем дело с потоком автомобилей как с непрерывной средой – сжимаемой жидкостью, и оперируем усредненными характеристиками, такими как плотность и скорость потока, и микроскопический, когда каждый автомобиль рассматривается в отдельности.

Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки. Так, при макроскопическом подходе время расчета не зависит от числа автомобилей в системе, но существуют ограничения на плотность потока: рассматривать мы можем лишь так называемый синхронизированный поток, когда расстояния между автомобилями порядка размеров самих автомобилей, а скорости далеки от скоростей свободного движения. Динамика сильно разреженного потока не удовлетворяет уравнениям, используемым в макромоделях. Эти уравнения, сходные с газодинамическими, но с дополнительными членами, отвечающими за «человеческий фактор», описывают сплошную среду, поэтому транспортный поток должен быть достаточно плотным и однородным. Размеры расчетной области в данном подходе должны быть много больше характерного размера автомобилей, а также отсутствует возможность описывать элементы управления городской дорожной сети: светофоры, знаки приоритета и т.п.

В микроскопическом подходе нет ограничений на плотность потока. В этом подходе 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. Описывая каждый автомобиль в отдельности, мы можем достигнуть гораздо большей точности и детализации при описании стратегий водителей, в явном виде отображать обгоны и перестроения, реакцию на дорожные знаки, светофоры и различные события.

Поскольку современные компьютерные системы позволяют работать с большим числом участников дорожного движения, микроскопический подход в настоящее время представляется более перспективным.

Данная работа посвящена дальнейшему развитию двумерной (многополосной) модели, созданной ранее коллективом авторов из ИПМ им. М. В. Келдыша РАН и использующей микроскопический подход [4]. Модель является обобщением однополосной модели Нагеля—Шрекенберга [2], использующей теорию клеточных автоматов, на многополосный случай.

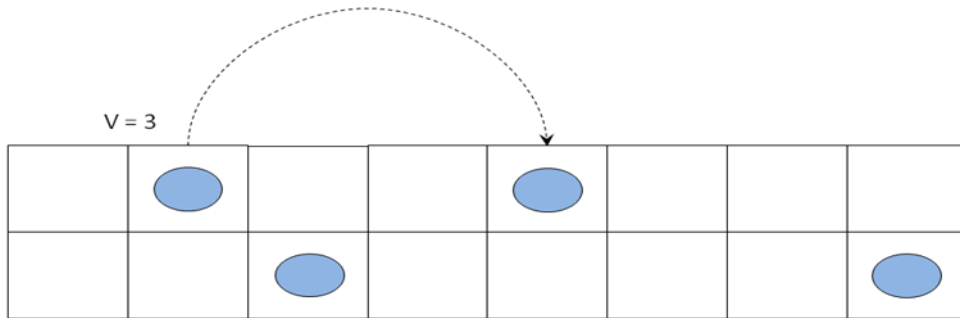
## **Микроскопическая модель на основе теории клеточных автоматов**

В основу многополосной модели положена одномерная модель Нагеля—Шрекенберга [1], 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 возможностями существующей в настоящее время вычислительной техники сверхвысокой производительности модели данного типа могут с успехом применяться и для моделирования движения на больших дорожных сетях.

Трасса в [1] представляется в виде одномерной решетки, каждая ячейка которой может быть либо 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 [2] приводится подробное описание обобщения одномерной модели Нагеля-Шрекенберга на многополосный случай. 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. 1:



*Рис. 1.* 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. Ширина ячейки соответствует стандартной ширине полосы автомобильной дороги. Шаг по времени равен 1 секунде.

В 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. Вторым параметром характеризует наличие «спокойных» водителей, не склонных лишиться 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 присваивается 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.

Для реализации нового алгоритма перестроения автомобилей в модель введены следующие параметры: желание водителя перестроиться в соседнюю полосу (левую или правую), а также маркер, определяющий данного водителя как вежливого.

Для моделирования сужений, расширений и неподвижных препятствий на дороге используется уже существующий в модели параметр – скорость. Если скорость объекта равна -10, этот объект – неподвижный, он не подчиняется обычному алгоритму обновления состояния ячеек, при этом ячейка считается занятой и автомобили вынуждены останавливаться перед ней и объезжать ее. Водители способны заранее видеть неподвижный объект при приближении к нему, что побуждает их перестраиваться в соседние полосы.

## Структура программы

### *Общий алгоритм*

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, задание граничных условий – входящих потоков.

5) Добавление автомобилей на границе согласно граничным условиям.

6) Проверка наличия очереди на въезд, добавление автомобилей из очереди.

7) Смена полосы.

8) – 11) Шаги из модели Нагеля—Шрекенберга. Обновление состояния ячеек – выбор из вариантов:

- алгоритм движения по прямолинейному участку;
- алгоритм прохождения регулируемого перекрестка;
- алгоритм прохождения нерегулируемого перекрестка, въезда/выезда;
- алгоритм прохождения участка с сужением/расширением;
- алгоритм прохождения участка с ДТП.

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

Подробнее об указанных алгоритмах и программной реализации можно прочитать в работах [3] и [4].

## **Различные стратегии поведения водителей на дороге**

Поведение водителей на дороге может существенно отличаться в зависимости от их личностных качеств, стажа вождения и других параметров. Учет этих стратегий облегчает калибровку модели при практическом моделировании на участках дорожных сетей реальных городов (например, в больших городах стиль вождения, как правило, носит более агрессивный характер, а в городах с неинтенсивным движением – более спокойный). Также, как известно, частая смена полосы отдельных водителей может существенно влиять на весь транспортный поток, порождая волны уплотнений при стесненном движении, даже при отсутствии физических препятствий на дороге.

В модели реализованы две стратегии перестроения водителей.

- «Осторожные» водители для смены полосы выбирают большой интервал до следующего автотранспортного средства в целевой полосе. Расстояние до следующего автомобиля должно быть больше максимально разрешенной скорости в системе.

- «Агрессивные» водители оценивают текущую скорость следующего автомобиля, движущегося по целевой полосе, и перестраиваются вплотную, сохраняя лишь минимальный зазор, необходимый для обеспечения безопасности.

Количество тех и других водителей в системе, а также условия на скорость можно варьировать.

Часть водителей в системе могут, при определенных условиях, стать «вежливыми», то есть пропустить автомобиль из соседнего ряда, который хочет перестроиться, но не имеет такой возможности по соображениям безопасности. «Вежливым» может быть как «агрессивный», так и «осторожный» водитель.

## **Алгоритм «вежливый водитель» в рамках общего алгоритма перестроения**

Целью данного алгоритма является описание кооперации водителей для прохождения сужений или неожиданных препятствий на дорогах. Как известно, по правилам дорожного движения автомобили из полосы, где находится препятствие, могут перестроиться в соседнюю полосу для объезда только в том случае, если они не мешают водителям из свободной полосы. Однако на практике в ситуации плотного потока или затора это бы привело к тому, что такие автомобили были бы вынуждены ждать освобождения целевой полосы очень долго. На этот случай существует негласное правило проезда «елочкой»: по очереди, один автомобиль из полосы с препятствием – один автомобиль из



полосы без препятствия. Конечно, не все водители поголовно применяют это правило. Недостаток водителей, готовых пропускать других добровольно, однако, восполняется наличием более агрессивных, которые «вклиниваются» в полосу, не оставляя выбора, кроме как остановиться и пропустить их.

Оба варианта описываются созданным алгоритмом.

По сравнению с предыдущей версией [4], общий алгоритм перестроения модифицирован с целью обеспечения моделирования различных сценариев при объезде автомобилями неподвижных препятствий на дороге.

Для того чтобы избежать конфликта при перестроении автомобилей в один и тот же ряд справа и слева, перестроение направо происходит на четных временных шагах, налево – на нечетных.

Смена полосы в программе реализована с использованием переменной типа `bool`, которая принимает значение `true`, если смена полосы должна состояться, и `false` в обратном случае. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 2.

При входе в логический модуль, определяющий, будет ли водитель перестраиваться, значение переменной равно `false` (нет смены полосы). Затем проверяются следующие условия:

- выгодно ли водителю перестроиться? Сравниваются скорости и расстояния до автомобилей в текущей полосе и в целевой полосе. Если скорость в соседней полосе больше, а локальная плотность автомобилей меньше, то решение принимается в пользу перестроения;

- нужно ли перестроение для объезда препятствия? Сначала проверяется, есть ли препятствие в текущей полосе. Если ответ отрицательный и перестроение не нужно, значение `bool`-переменной не переопределяется. Если ответ положительный, то проверяется, занимает ли препятствие более одной полосы, и определяется, с какой стороны лучше его объехать. Исходя из этого принимается решение о перестроении (да – если на данном шаге происходит перестроение в нужную, то есть предпочтительную для объезда, сторону, нет – в обратном случае);

- безопасно ли перестроение? Тут возможна реализация различных стратегий: осторожные водители меняют полосу, только если расстояние до следующего автомобиля в соседней полосе больше, чем максимальная скорость. Более решительные водители сравнивают расстояние до следующего автомобиля не с максимальной скоростью в модели, а с реальной скоростью следующей машины. Если расстояние достаточно и если скорость впереди идущего автомобиля в целевой полосе больше или равна скорости рассматриваемого, то принимается решение в пользу перестроения, в обратном случае перестроение отменяется;

- с определенной вероятностью водитель, принявший решение о перестроении и убедившийся в его безопасности, может поменять его и остаться в текущем ряду.

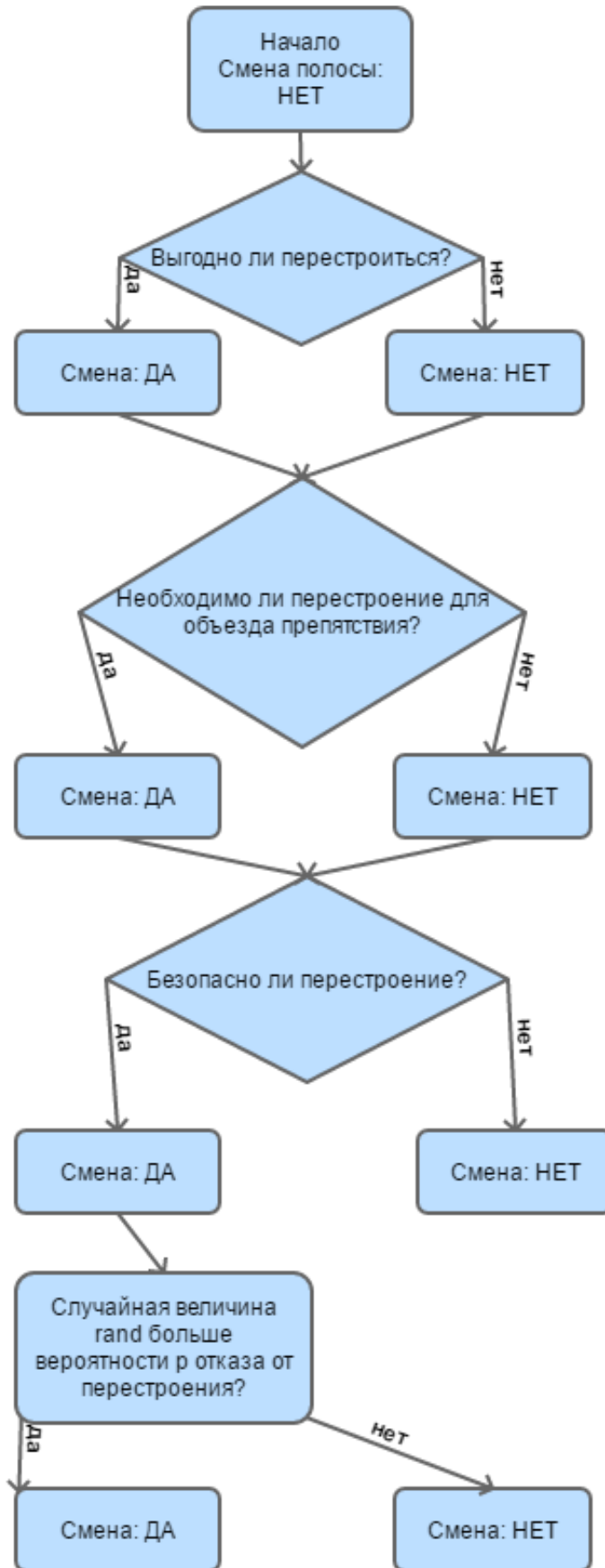


Рис. 2. Блок-схема алгоритма перестроения автомобилей

В результате выполнения этих шагов мы получаем окончательное решение о смене полосы. Если оно положительное, выполняется перестроение.

Важной частью алгоритма «вежливый водитель» является определение желания водителя перестроиться, вне зависимости от того, имеется ли на данном временном шаге такая возможность или нет. Для этого значение переменной, отвечающей за перестроение, сохраняется в отдельную переменную до того, как происходит проверка условия безопасности.

Таким образом, для всех автомобилей в системе на каждом временном шаге мы определили наличие или отсутствие желания сменить полосу. Для того чтобы приписать автомобилю свойство «вежливый», мы смотрим, есть ли вокруг него автомобили, желающие перестроиться, которые он может пропустить, равна ли их скорость нулю (то есть в их полосе движение уже сильно стеснено), достаточно ли низкая скорость у рассматриваемого автомобиля, чтобы остановиться. Не каждый водитель при выполнении этих условий станет «вежливым». Чтобы обеспечить необходимый разброс этого параметра, соответствующий реальной ситуации, проверяется ID автомобиля. Если ID четный, водитель может стать «вежливым». Таким образом, половина водителей в системе будут пропускать автомобили из соседних рядов. Эту долю, разумеется, можно варьировать при необходимости.

Если водитель на текущем временном шаге стал «вежливым» и пропустил транспортное средство, то на следующем шаге он уже не может стать «вежливым». Это сделано для обеспечения очередности проезда препятствия.

Если в текущей полосе имеется препятствие и при этом в полосе, где находится автомобиль, желающий перестроиться, препятствия нет, то в этом случае водитель не будет пропускать данный автомобиль.

Для того чтобы объезд препятствий происходил эффективнее, при скоплении автомобилей в ряду с препятствием водители из других рядов реагируют на это, снижая скорость, упрощая тем самым перестроение. Такое поведение можно наблюдать на дороге: видя аварию или какой-либо неподвижный объект на дороге, водители замедляются.

## **Примеры тестовых расчетов**

### *Объезд ДТП. Сравнение различных стратегий перестроения*

На рисунках 3а, 3б представлена визуализация расчета, выполненного при помощи новых алгоритмов перестроения.

На рисунках изображен участок трехполосной дороги, в верхней части направление движения справа налево, в нижней части – слева направо. Квадратами обозначены автомобили. В данном расчете автомобили имеют разный цвет – бирюзовый и красный – в зависимости от направления их движения. Черным цветом обозначены стоящие автомобили – участники ДТП. В расчете они играют роль неподвижного препятствия.

Расчет, представленный на рисунке 3а, выполнен для ситуации, когда все водители являются «осторожными», то есть для перестроения ждут образования зазора на целевой полосе, равного как минимум максимально разрешенной скорости в системе. На рисунке 3б водители перестраиваются более смело, сравнивая имеющийся промежуток на целевой полосе с текущей скоростью следующего автомобиля. Как видно из рисунков, при «агрессивной» стратегии перестроения водителям удается преодолеть возникшее препятствие более эффективно: плотность автомобилей перед препятствием во втором случае меньше, итоговая фактическая пропускная способность участка больше.

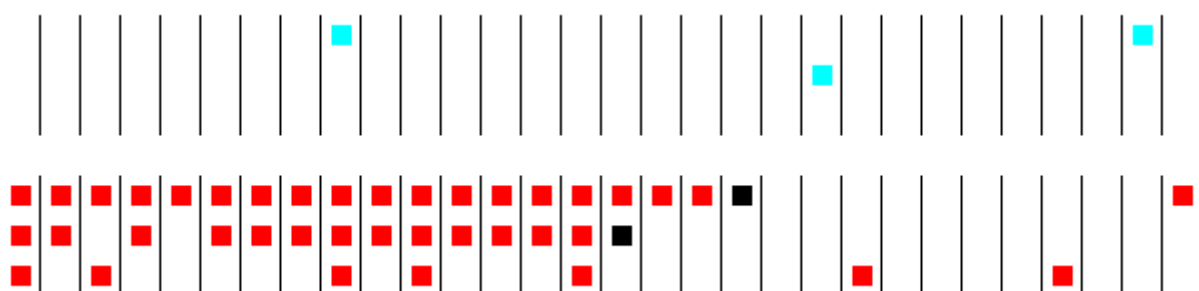


Рис. 3а. «Осторожные» водители

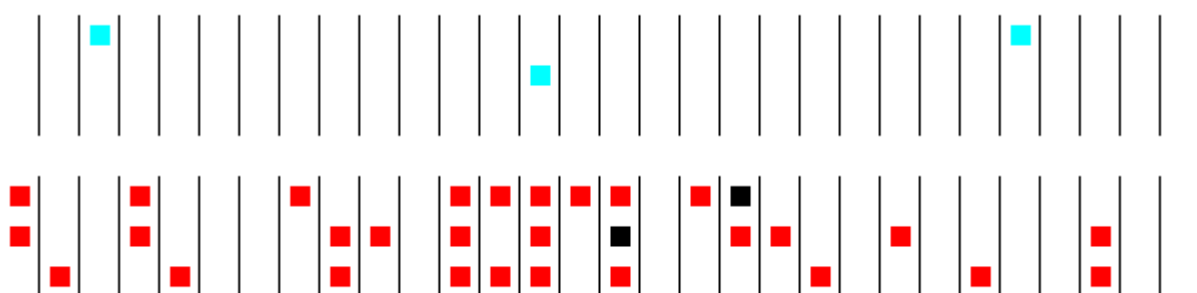


Рис. 3б. «Агрессивные» водители

### *Сужение дороги*

Другая тестовая задача – дорога с сужением («бутылочным горлом»); три полосы переходят в одну. В верхней части дорожного участка движение происходит справа налево, в нижней – слева направо. В данном расчете поток по нижней части дороги равен нулю, автомобилей нет. Цвет автомобилей здесь отвечает полосе въезда (бирюзовый – правая полоса, синий – средняя, зеленый – левая). Это сделано для того, чтобы было удобно следить за перестроениями автомобилей. Оранжевым цветом отмечены автомобили, в данный момент являющиеся «вежливыми», то есть готовящимися пропустить автомобиль из соседней полосы.

На рисунке 4а представлен расчет для системы без вежливых водителей, на рисунке 4б – расчет для системы с «вежливыми» водителями.

Расчеты показывают, что наличие вежливых водителей способно облегчить перестроение автомобилей, въехавших на правые полосы, в полосу

без препятствия и тем самым увеличить итоговую пропускную способность участка дороги с сужением.

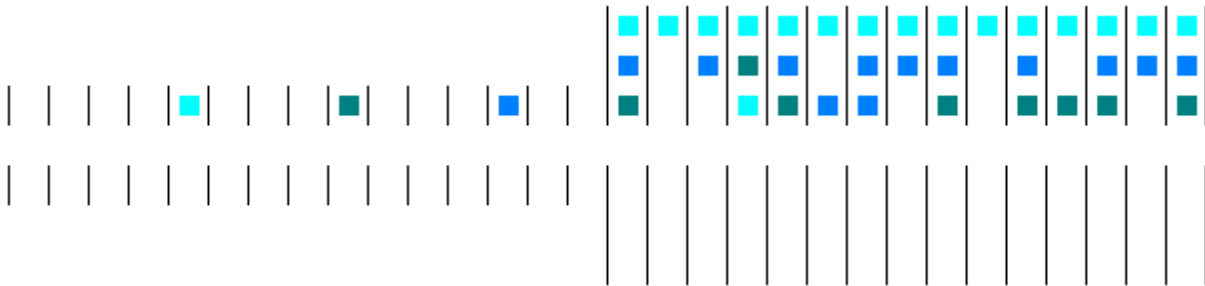


Рис. 4а. Расчет без «вежливых» водителей

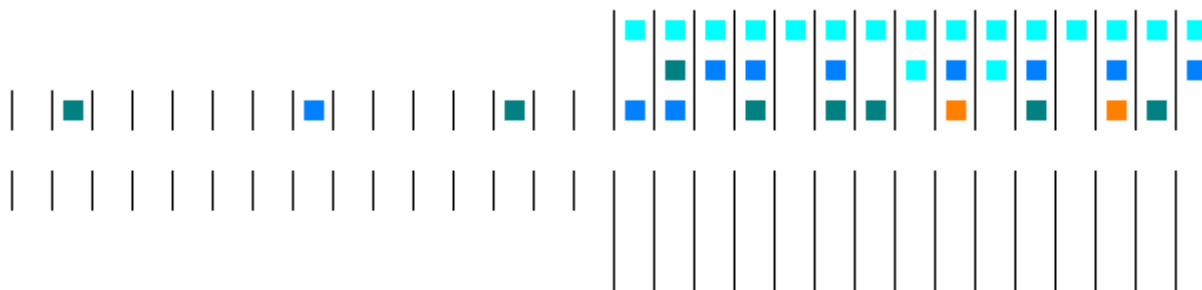


Рис. 4б. Расчет с «вежливыми» водителями

## Заключение

В настоящее время, в связи с развитием вычислительных мощностей компьютерных систем, появилась возможность моделировать транспортные потоки с учетом большого числа характеристик транспортных средств, что позволяет точнее воспроизводить реальные наблюдаемые закономерности дорожного движения. Учет различных стратегий вождения с этой точки зрения представляется важной и перспективной задачей.

В дальнейшем планируется провести ряд вычислительных экспериментов по моделированию формирования широких движущихся кластеров в плотном транспортном потоке на дороге с въездами и сужениями и без них.

## Список литературы

- [1] Nagel K., Schreckenberg M. A Cellular automaton model for freeway traffic // J. Phys. I France. – 1992. – V. 2. - P. 2221-2229.
- [2] Трапезникова М. А., Чечина А. А., Чурбанова Н. Г. Двумерная модель клеточных автоматов для описания динамики транспортных потоков на элементах улично-дорожной сети. // Математическое моделирование, 2017, том 19, номер 9, С. 110-120.

[3] Чечина А. А., Герман М. С., Ермаков А. В., Трапезникова М. А., Чурбанова Н. Г. Моделирование и визуализация потоков автотранспорта на элементах улично-дорожной сети с использованием комплекса программ САМ-2D // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2016. № 124. 17 с.

[4] 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.

## Оглавление

Введение.....	3
Микроскопическая модель на основе теории клеточных автоматов.....	4
Параметры микроскопической модели.....	5
Параметры движения АТС.....	5
Структура программы.....	6
Различные стратегии поведения водителей на дороге.....	7
Алгоритм «вежливый водитель» в рамках общего алгоритма перестроения.....	7
Примеры тестовых расчетов.....	10
Заключение.....	12
Список литературы.....	12