

АННОТАЦИЯ

Соколов В.С. Построение дискретных математических моделей дорожного движения. – Челябинск: ЮУрГУ, ЕТ-411, 42 с., 12 ил., 2 табл., библиогр. список – 11 наименований, 1 приложение.

Выпускной квалификационный проект выполнен с целью создания дискретной модели для дорожного движения на микроуровне с использованием стохастических клеточных автоматов.

В выпускном квалификационном проекте проанализированы различные методологии построения моделей дорожного движения. Основными моделями дорожного движения являются модели на макро-, микро- и мезоуровне. В качестве основных моделей рассмотрены способы микромоделирования на основе клеточных автоматов. Создана структура модели дорожного движения с помощью метода клеточных автоматов. При этом в модели учтены следующие виды поведения на дороге: замедление и ускорение движения, перестроение с учётом заторов и качества дорожного покрытия. Построенные подмодели реализованы в виде программы, позволяющей осуществлять моделирование транспортных потоков на основе стохастических клеточных автоматов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОБЗОР МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ	7
1.1. Типы моделирования дорожного движения	7
1.1.1. Макромоделирование	8
1.1.2. Мезомоделирование.....	8
1.1.3. Микромоделирование.....	10
1.2. Дискретные модели в виде клеточных автоматов.....	11
1.2.1. Определение клеточного автомата.....	11
1.2.2. Математическое определение клеточного автомата	11
1.2.3. Свойства клеточного автомата	12
1.2.4. Применение клеточных автоматов.....	13
1.3. Цепи Маркова в клеточных автоматах	14
1.3.1. Определение Цепи Маркова	14
1.3.2. Цепи Маркова с дискретным временем.....	14
1.4. Выводы по первому разделу	15
2. ПОСТРОЕНИЕ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ..	17
2.1. Общая постановка задачи	17
2.2. Клеточные автоматы для однополосного движения.....	17
2.2.1. Элементарная модель клеточного автомата.....	17
2.2.2. Модель Нагеля – Шрекенберга.....	20
2.2.3. Модель медленного старта.....	21
2.3. Клеточные автоматы для многополосной дороги	23
2.4. Выводы по второму разделу	25
3. ОПИСАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ	26
3.1. Алгоритм.....	26
3.1.1. Общие сведения	26
3.1.2. Определение необходимости смены полосы движения	27
3.1.3. Определение возможности смены полосы движения	29
3.1.4. Перестроение.....	30
3.1.5. Передвижение.....	31

3.1.6. Блок схема алгоритма.....	35
3.2. Результаты модели.....	36
3.2.1. Моделирование обгона.....	36
3.2.2. Моделирования объезда препятствия.....	37
3.2.3. Ряд перестроений.....	39
3.3. Выводы по третьему разделу.....	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	41
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	42
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	43

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития человечества невозможно представить без транспортного сообщения. Дорожные системы обеспечивают сообщение между населёнными пунктами и между ними. Непрерывно увеличивающееся число автомобилей приводит к необходимости оптимизировать дорожную сеть для удовлетворения всё нарастающих потребностей городов. Для минимизации инвестиционных рисков, необходимо учесть закономерности развития системы дорог, рассредоточение потока машин на отдельных её участках. Именно поэтому моделирование и оптимальное планирование дорожной сети имеет огромное значение. Различные способы моделирования транспортных потоков призваны решать наиболее актуальные транспортные проблемы. Многие из этих моделей позволяют определять такие параметры, как интенсивность движения, средняя скорость движения, задержки и потери времени в зависимости от многих факторов.

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 и дискретные модели на основе теории клеточных автоматов, позволяющие моделировать технические, социальные, экономические, биологические и другие объекты.

Моделирование транспортных систем на микроуровне позволяет отслеживать динамику перемещения как отдельно взятого автомобиля, так и потока автомашин в целом, а также получать исходные данные для оценки средней скорости движения, скорости и времени сообщения, поведения автомобилистов в различных условиях движения, времени простоев в пробках.

Результаты моделирования, могут являться основой при принятии решений, касающихся планирования дорожной сети в городе, установки

знаков дорожного движения, введения новых правил для регламентации парковки или въездов в город, движения в центральной части мегаполисов и так далее. Моделирование загруженных участков дороги помогает отыскать наиболее оптимальные пути решения проблемы, а также может послужить основой в выборе дальнейшего плана развития транспортной сети.

Целью данной работы является построение дискретной модели дорожного движения на микроуровне с использованием стохастических клеточных автоматов. Для достижения данной цели нужно решить следующие задачи:

- 1) выполнить обзор существующих методов моделирования дорожного движения;
- 2) изучить методы, применяемые для построения дискретных моделей;
- 3) построить дискретную математическую модель дорожного движения при различных условиях;
- 4) разработать программу, визуализирующую обстановку на куске дорожного полотна с учетом задаваемых условий.

В первом разделе проведен обзор накопленного опыта в области моделирования дорожного движения различными подходами. И углублённое рассмотрение теории клеточных автоматов.

Второй раздел содержит описание дискретной модели дорожного движения, основанной на стохастическом транспортном клеточном автомате. Приведено формальное математическое описание модели.

1. ОБЗОР МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

1.1. Типы моделирования дорожного движения

В дорожном движении одновременно принимает участие огромное количество автомобилей, которые непосредственно взаимодействуют друг с другом, это делает законы движения транспорта сложными и нелинейными. И наличие человеческого фактора, ещё больше усложняет основанную на строгих законах механики, систему. Что, фактически, приводит к феномену появления кластеров и волн распределения плотности автомобильного потока, которые распространяются в обоих направлениях. А анализ результатов экспериментов усложняется большими отклонениями в измеряемых величинах, например, в средней скорости автомобилей.

Анализ автомобильного трафика также затрудняется из-за формы кривой скорости, описываемой как боковая парабола. При превышении оптимальной плотности автомобилей на выделенном участке дороги, дорожный трафик становится нестабильным. В этой ситуации любой, даже небольшой инцидент может повлечь срыв непрерывного потока, выражающийся в постоянном чередовании этапов остановки и движения.

Исходя из вышеперечисленных факторов, способы моделирования автомобильного трафика подразделяют на три группы, каждая из которых основана на определённых методах наблюдения в физике:

- 1) макромоделли (аналогия с динамикой жидкости, газа);
- 2) мезомодели (модели распределения вероятностей, распределения временных интервалов);
- 3) микромоделли (следование за лидером, клеточные автоматы).

Каждая группа моделей имеет свои сильные и слабые стороны. И соответственно свою наиболее подходящую область применения.

1.1.1. Макромоделирование

Макромоделирование – тип моделирования, основанный на применении к автомобильному потоку законов гидродинамики, по аналогии с жидкостью в трубе. Соответственно макромоделирование заключается в написании систем дифференциальных уравнений в частных производных, составленных для интересующих величин – например, средней скорости автомобилей или плотности потока машин. Практика наблюдения дорожного движения показывает, что в плотном, но свободном трафике пробки могут возникать спонтанно, даже вследствие малозначимых событий (так называемый «эффект бабочки»), в частности, из-за резкого торможения одного из участников дорожного движения. Эту ситуацию в макромоделировании часто сравнивают с внезапным замерзанием переохлажденной жидкости. Впрочем, в отличие от жидкости, автомобильный трафик подвержен влиянию установленных сигналов, таких как знаки и светофоры, и других событий (особенно на развязках), которые периодически затрагивают движение. Для решения этой проблемы используют модели матриц энтропии, которые учитывают этот эффект, группируя транспорт и добавляя элемент случайности к шаблонам движения авто-трафика на отдельных участках дорожной сети.

Многие исследователи отказываются от рассмотрения непрерывных моделей, находя их слишком грубыми. И всё же, использование макромоделей для получения сводных данных о большом потоке транспорта, таких как скорость и плотность на выбранном участке дороги, делает их полезными для крупномасштабного моделирования.

1.1.2. Мезомоделирование

Мезомодели представляют собой промежуточный этап между макро и микромоделями. Уровень детализации рассматриваемого транспортного потока, позволяет, не прибегая к моделированию движения каждого

участника дорожного движения, учесть особенности поведения водителей и получить модель более реалистично отражающую картину ситуации на дороге.

Мезомоделирование достаточно точно описывает автотранспортные средства, но при этом рассматривает их взаимодействие и поведение так же, как на макроуровне.

Одна из первых серьёзных мезомоделей заключалась во взаимодействии потоков транспорта двух связанных районов, эта модель носит название гравитационной модели, потому что основывается на законе всемирного тяготения. Основной её недостаток то, что суммарное количество машин в потоке связывается только с установленной парой районов. Однако, результаты моделирования могут зависеть от расположения района прибытия среди других районов.

Этот недостаток был учтен в моделях семейства конкурирующих центров. Эти модель основываются на втором законе термодинамики. Вследствие того, что транспортная система схожа с физической, наличием большого числа неуправляемых элементов, проблему определения транспортного потока заменяют максимизацией энтропии в моделируемой системе.

Ещё один вид мезомоделей, модели равновесного распределения, в условии модели предполагается, что все участники движения выбирают пути следования для достижения минимальной цены поездки. В результате процесса «проб и ошибок» в системе устанавливается равновесное распределение потоков, обладающее свойствами, известными как требования Вардрупа. Суть свойств заключается в следующем: при равновесном распределении автомобилей ни один автомобилист не будет менять выбранный путь, потому что цена поездки уже минимальна.

Главное достоинство моделей, построенных на этом уровне моделирования, их относительная компактность. Однако эти модели имеют и ряд существенных недостатков: они охватывают ограниченный набор

параметров (скорость, задержки, очереди), а также слабо учитывают динамику транспортного потока.

1.1.3.Микромоделирование

На микроуровне моделей дорожного движения автотранспортный поток складывается из взаимодействия множества отдельных машин и позволяет проследить и общую динамику потока автомобилей (на основе средних величин скорости, плотности, потока), так и каждого автомобиля в частности, потому что моделирование происходит на уровне отдельных объектов – транспортных средств.

Этот тип моделирования позволяет решать следующие задачи [4]:

- 1) оценить транспортную ситуацию конкретного проекта, основывая оценку на количественных показателях, характеризующих условия движения;
- 2) оценить пропускную способность различных вариантов движения и выбрать оптимальную схему организации движения на перекрёстке;
- 3) проанализировать пропускную способность и узнать характеристики движения в зоне остановок общественного транспорта;
- 4) спрогнозировать транспортные заторы на моделируемом участке движения;
- 5) смоделировать и проанализировать взаимодействие пешеходов и автотранспортных средств;
- 6) смоделировать дорожное движение при внесении изменений на транспортный участок;
- 7) установить наиболее загруженные места и места возникновения заторов.

На настоящий момент использование клеточных автоматов в моделировании дорожного движения является относительно новым и очень перспективным направлением.

1.2. Дискретные модели в виде клеточных автоматов

1.2.1. Определение клеточного автомата

Клеточные автоматы представляют собой математическую модель физического процесса, время и пространство в которой заданы дискретно и обладают некоторым набором правил для (дискретной) временной эволюции. Это регулярная решётка ячеек любой размерности, где каждая ячейка может находиться в одном из конечного множества состояний, таких как 0 и 1. И для каждой ячейки определено множество ячеек, которые называются окрестностью, к примеру, окрестность можно определить, как все ячейки расстояние до которых от выбранной ячейки не более 1. Для работы клеточного автомата необходимо задать начальное состояния всех ячеек и правил перехода ячеек из одного состояния в другое. Правила перехода и состояние соседних ячеек в окрестности будут использоваться на каждой итерации, для определения нового состояния каждой ячейки.

1.2.2. Математическое определение клеточного автомата

Двумерный клеточный автомат можно определить, как множество конечных автоматов на плоскости, помеченных целочисленными координатами (i, j) , каждый из которых может находиться в одном из k состояний.

$$\sigma_{i,j} \in \Sigma \equiv \{0, 1, 2 \dots k - 1, k\}. \quad (1)$$

Изменение состояний автоматов происходит согласно правилу перехода

$$\sigma_{i,j}(t + 1) = \varphi(\sigma_{k,l}(t) | (k, l) \in N(i, j)), \quad (2)$$

где $N(i, j)$ – некоторая окрестность точки (i, j) .

К примеру окрестность фон Неймана первого порядка определяется как:

$$N_N^1(i, j) = \{(k, l) | |i - k| + |j - l| \leq 1\}. \quad (3)$$

Окрестность фон Неймана показана на рисунке 1.

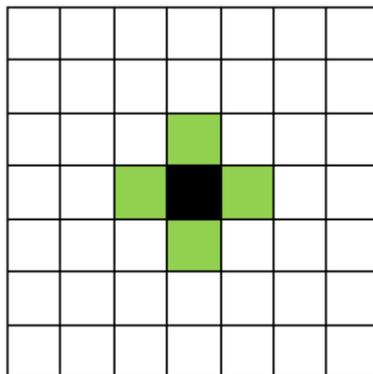


Рисунок 1.1 – Окрестность фон Неймана

А окрестность Мура первого порядка:

$$N_M^1(i, j) = \{(k, l) \mid |i - k| \leq 1, |j - l| \leq 1\}. \quad (4)$$

Окрестность Мура показана на рисунке 2.

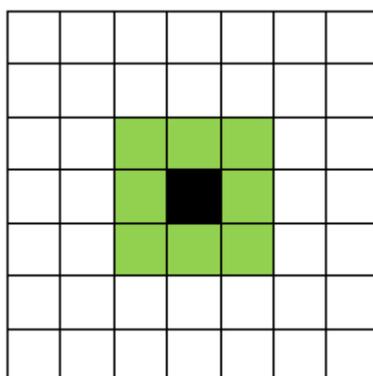


Рисунок 1.2 – Окрестность Мура

Число всех возможных правил перехода определяется числом состояний клетки σ и количеством соседей в её окрестности n и составляет:

$$N_r = \sigma^n. \quad (5)$$

1.2.3. Свойства клеточного автомата

Классический вариант реализации клеточного автомата обладает следующими набором свойств:

1. Новое состояние клетки определяют только элементы её окрестности, и, возможно, она сама – это свойство локальности правил клеточного автомата.

2. Вся область решётки задаётся одинаковым набором правил для каждой ячейки – свойство однородности системы. Однако на практике решётка автомата задаётся конечным множеством клеток, из-за ограничения объёма памяти вычислительных машин, в результате чего в моделях зачастую имеют место краевые эффекты – клетки, заданные на границах решётки, которые отличаются от остальных по числу соседей.

3. Число состояний клетки должно быть конечно. Это условие предотвращает ситуации, когда при итерации для получения нового состояния клетки требуется выполнить бесконечное число операций.

4. Все клетки клеточного автомата меняют свои значения одновременно в конце итерации, а не по мере выполнения вычислений. Благодаря этому свойств порядок перебора клеток в решётке не влияет на результат.

1.2.4. Применение клеточных автоматов

Наиболее частое и развитое направление применения клеточных автоматов – это математическое моделирование динамических процессов. Математическое моделирование физических явлений часто приводит к ситуации, когда рассматриваемая задача не может быть решена аналитически, а использование разностной схемы для расчёта приводит к появлению различных неустойчивостей.

Именно поэтому клеточные автоматы получают широкое практическое применение в разнообразных областях научных исследований, моделирующих различные физические и информационные процессы. С их помощью описываются такие явления, как образование микроструктуры материалов, диффузия веществ, химические реакции, теплопроводность, преобразование и шифрование информации, урбанизация, работа дорожного

перекрестка, макродинамика экопопуляций, перемещение толпы, работа и восстановление сердечного ритма. Как видно по вышеперечисленному, клеточные автоматы могут использоваться, в качестве вычислительного инструмента для большого количества различных задач. Они служат для упрощения расчётов в тех ситуациях, когда традиционные методы приводят к сложным и затратным вычислениям.

Разумеется, способ клеточных автоматов не является универсальным и наряду со своими достоинствами, он имеет и ряд серьезных недостатков.

Пожалуй, главным недостатком такого подхода является сложность моделирования громоздких или сложных структур, состоящих из большого числа объектов, каждый из которых необходимо рассматривать в отдельности. Это может сделать вычисления следующих состояний модели неоправданно сложными.

1.3. Цепи Маркова в клеточных автоматах

Для моделирования каждого последующего шага при использовании клеточных автоматов используются Цепи Маркова.

1.3.1. Определение Цепи Маркова

Цепи Маркова – последовательность случайных событий с конечным или счётным числом исходов, характеризующаяся тем свойством, что, при фиксированном настоящем будущее независимо от прошлого. То есть цепь Маркова – это взвешенный граф. В его вершинах находятся события, а в качестве веса ребра, соединяющего вершины А и В – вероятность того, что после события А последует событие В.

1.3.2. Цепи Маркова с дискретным временем

Последовательность дискретных случайных величин $\{X_n\}$, $n > 0$ называется простой цепью Маркова с дискретным временем, если

$$P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) = P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n). \quad (6)$$

Таким образом, в простейшем случае условное распределение последующего состояния цепи Маркова зависит только от текущего состояния и не зависит от всех предыдущих состояний (в отличие от цепей Маркова высших порядков).

Область значений случайных величин $\{X_n\}$, называется пространством состояний цепи, а номер n – номером шага.

Матрица $P(n), P_{i,j}(n) \equiv P(X_{n+1} = j | X_n = i)$ в цепи Маркова – это матрица переходных вероятностей на n -м шаге.

Вектор $p = (p_1, p_2, \dots)$, где $p_i \equiv P(X_0 = i)$ называется начальным распределением цепи Маркова.

Матрица перехода в цепях Маркова является стохастической, то есть $\sum_j P_{i,j}(n) = 1, \forall n \in \mathbb{N}$.

Цепь Маркова называется однородной, если матрица переходных вероятностей не зависит от номера шага, то есть $P_{i,j}(n) = P_{i,j}, \forall n \in \mathbb{N}$, иначе цепь Маркова называется неоднородной.

Для однородных цепей Маркова матрица переходных вероятностей за n шагов есть n -я степень матрицы переходных вероятностей за 1 шаг. Соответственно $P(X_n = i_n) = ((P^T)^n p)_{i_n}$.

1.4. Выводы по первому разделу

В этом разделе рассмотрены различные подходы к моделированию дорожного движения. На основании рассмотренных данных можно сделать выводы о плюсах и минусах представленных способов. Подробно рассмотрен раздел микромоделирования с помощью клеточных автоматов, которые будут служить основой для разрабатываемой модели. Клеточные автоматы отвечают представленным требованиям дискретности и точности моделирования отдельных объектов.

Для построения дискретной модели выберем многополосную модель стохастического клеточного автомата для одностороннего движения.

2. ПОСТРОЕНИЕ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

2.1. Общая постановка задачи

1. Разработать модель дорожного движения, учитывающую структуру потока автотранспорта и скоростные ограничения.
2. Разработать программный инструментарий для моделирования потоков автомашин.
3. Провести анализ полученной модели.

2.2. Клеточные автоматы для однополосного движения

2.2.1. Элементарная модель клеточного автомата

Для моделирования дорожного движения с помощью метода клеточных автоматов за основу возьмём модель, элементарного клеточного автомата, то есть одномерный клеточный автомат с двумя состояниями (0 и 1). Эта модель носит названия правило 184, предложенного в работе [5].

Правило 184 позволяет описывать различные процессы, протекающие в системах частиц:

1. Замирание частиц при падении на неровные поверхности. При каждой итерации полости поверхности заполняются частицами, которые, оседая на поверхности, так и остаются в этом положении без изменений.
2. Обоюдное уничтожение движущихся навстречу друг другу частиц и античастиц при взаимодействии. Первые формируются между пустыми клетками, вторые – между непустыми. Другие вариации формируют “фон” который не влияет на общую картину. Столкнувшийся частицы и античастицы пропадают, оставляя за собой фон.
3. Простейшая модель потока автотранспорта, в которой машины, представляющие в этой системе частицы, движутся в одном направлении, делая остановки и возобновляя движение в зависимости от наличия или

отсутствия автомобилей впереди. Эта сфера применения модели даже породила новое название – правило транспортного потока.

Как написано в работе [8], эта модель – наиболее простой пример применения клеточных автоматов к моделированию транспортного потока, которая может служить основой для более сложных и функциональных моделей.

Состояние автомата в модели описывается с помощью одномерного массива ячеек, каждая из которых содержит одно из значений – 0 или 1. На каждой итерации к автомату применяется предопределённый набор правил, которые регламентируют переход состояния ячеек автомата из одного состояния в другое, данные о работе такого автомата приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Таблица переходов для правила 184

Текущий шаблон	111	110	101	100	011	010	001	000
Новое состояние центральной ячейки	1	0	1	1	1	0	0	0

Первая строка таблицы содержит состояния трёх ячеек – центральной, для которой в таблице будет вычисляться следующее значение, а также её окрестности – левой и правой ячейки, которые определяют новое состояние центральной ячейки на каждом шаге. Вторая строка содержит новые состояния центральной ячейки в зависимости от её соседей. Полученные новые значения состояний ячейки и дали название этому правилу – $10111000_2 = 184_{10}$.

Правило перехода состояния ячеек в указанной модели можно задать следующим образом: если ячейка i – не пуста, а $(i + 1)$ – пуста, то на следующем шаге ячейка $(i + 1)$ – будет не пуста. Значение ячейки i для следующих итерации определяется её соседом слева, и для любой ячейки схема определения состояния будет аналогична.

Для подробного рассмотрения данного метода проследим за итерациями следующего состояния автомата: 0110101001. Следующие пять итераций будут выглядеть как показано в таблице 2.

Таблица 2 – Итерации элементарного клеточного автомата

Итерация	Конфигурация
0	0110101001
1	0101010100
2	0010101010
3	0001010101
4	0000101010
5	0000010101
...	...

Эволюция этого клеточного автомата является моделью движения машин по однополосной дороге с максимальной скоростью, которая равняется одной ячейки в единицу времени. Шаблоны вида 011 и 111 соответствуют появлению затора, при котором сзади идущий автомобиль, не может продолжить движение и вынужден оставаться на месте, пока впереди идущий не образуется свободное пространство для движения.

Правила перехода для каждого объекта решётки можно записать следующим образом:

1. Ускорение и торможение:

$$v_i(t) = \min(g_i(t-1), 1). \quad (7)$$

2. Перемещение:

$$n_i(t) = n_i(t-1) + v_i(t). \quad (8)$$

Моделью правила 184 является детерминированный клеточный автомат, что означает отсутствие элемента случайности в правилах перехода ячеек.

Поэтому эта модель описывает лишь идеальный случай движения, не предоставляя возможности моделирования реального потока автомобилей.

2.2.2. Модель Нагеля – Шрекенберга

Модель, которую разработали немецкие учёные Кай Нагель и Майкл Шрекенберг, является логичным развитием одномерного клеточного автомата, учитывающего случайные возмущения, предназначенного для моделирования транспортного потока [10]. Для однополосного движения модель Нагеля – Шрекенберга представляет собой одномерную сетку, каждая ячейка которой может быть либо свободна, либо занята автомобилем.

Для этой модели разработаны следующие данные: длина ячейки принимается равной 7,5 м, эту величину было принято взять как место занимаемой автомобилем (например, в пробке). Переменные n_i и v_i задают координату и скорость i -го автомобиля; $g_i = n_i + 1 - l_i - n_{i-1}$ дистанция до впереди идущего автомобиля; l_i – длина i -го автомобиля, однако в случае рассматриваемой модели $l_i = l = 1$ всегда. Скорость автомобиля в модели принимает одно из $(v_{max}+1)$ допустимых целочисленных значений переменной v_i $0, 1, 2, \dots, v_{max}$.

Каждая итерация обновляет состояние автомобилей в системе по следующими правилами:

1. Ускорение – если $v_i < v_{max}$, то скорость i -го автомобиля увеличивается на единицу за итерацию; если $v_i = v_{max}$, скорость остаётся неизменной:

$$v_i(t) = \min(v_i(t-1) + 1, v_{max}). \quad (9)$$

2. Торможение – если полученная в результате итерации скорость равняется или превышает расстояние до впереди идущей машины, то значение скорости приравнивается к этому расстоянию:

$$v_i(t) = \min(v_i(t-1) + 1, v_{max}). \quad (10)$$

3. Случайное возмущение – с вероятностью p водитель может беспричинно уменьшить скорость на единицу:

$$\text{if } f(t) < p \text{ then } v_i(t) = \max(v_i(t) - 1, 0). \quad (11)$$

4. Движение – изменение расположение машины на сетке клеточного автомата в соответствии с последней вычисленной скоростью:

$$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t). \quad (12)$$

Первое правило задаёт общее стремление участников дорожного движения ехать с максимальной допустимой скоростью, а второе – гарантирует отсутствие ДТП при столкновении с впереди идущим автомобилем.

Стохастичность модели задаётся третьим правилом, которое описывает случайность в поведении водителя и прочие вероятностные факторы, переменная $f(t)$ – случайная равномерно распределённая величина. Четвёртое правило определяет количество ячеек, которое пройдёт автомобиль за одну итерацию.

2.2.3. Модель медленного старта

Выше рассмотренные модели транспортных потоков имеют серьёзный недостаток – задающие их правила перехода не позволяют воспроизводить явление резкого спада пропускной способности дорог при переходе в фазу синхронизованного потока. Причина такого явления кроется в нестабильности поведения заторов, которая обуславливается слишком быстрым оттоком автомобилей, как написано в работе [6]. Для получения более реалистичной картины дорожной ситуации необходимо задать правила перехода таким образом, чтобы интенсивность оттока автомобилей из затора была меньше интенсивности притока новых автотранспортных средств в затор. В модели медленного старта – это свойство достигается путём

введения задержки ускорения автомобиля с нулевой скоростью. Такие модели получили название моделей медленного старта

На основании правила 184 была создана модель, включающая задержку набора скорости автомобилями, находящимися в состоянии покоя.

Предпосылкой к созданию такой модели послужил тот факт, что обычные транспортные средства, движущиеся с относительно высокой скоростью, могут достаточно быстро остановиться, но для того, чтобы набрать скорость им потребуется значительно больше времени. В рассматриваемой ниже модели автомобили начинают набирать скорость только после того, как первый автомобиль начинает движение и освобождает позади себя свободное пространство.

Модель функционирует по представленному ниже набору правил:

1. Торможение:

$$\text{if } v_i(t - 1) > g_i(t - 1) \text{ then } v_i(t) = g_i(t - 1). \quad (13)$$

2. Запаздывающее ускорение:

$$\text{if } v_i(t - 1) = 0 \text{ and } g_i(t - 1) \geq 2 \text{ then } v_i(t) = 1. \quad (14)$$

3. Движение:

$$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t). \quad (15)$$

Из всего перечисленного следует, что автомобиль будет двигаться с заданной правилом 184 скоростью в одну ячейку за итерацию до тех пор, пока не возникнет необходимость остановиться, следуя условию торможения. После этого движение будет продолжено только тогда, когда расстояние до впередиидущей машины g_i будет больше или равно двум. С помощью этой системы правил, моделью реализуется запаздывающее ускорение, которое оказывает влияние только на машины с нулевой скоростью. Само же движение автомобилей вне заторов осуществляется по вышеописанному правилу движения.

В дальнейшем модель может быть улучшена введением вероятности срабатывания правила медленного старта при величине интервала до следующей машины в одну ячейку.

Однополосные модели дорожного движения на основе клеточных автоматов отлично подходят для задания однородного по составу автотранспортного потока, что подразумевает одинаковые технические характеристики и, как следствие, скорости автомобилей. Как отмечено в работе [7], введение различных по скоростным характеристикам автомашин (например, легковых и грузовых машин, автобусов) на однополосную дорогу в скором времени приводит к формированию колонн, ведомых самыми медленными транспортными средствами. Поэтому модели движения с учётом одной полосы движения логичным образом перерастают в модели, в которых машины движутся в соответствии с правилами движения по многополосной дороге, то есть с возможностью перестроения на другую полосу.

2.3. Клеточные автоматы для многополосной дороги

В работах [9, 11] описаны наборы правил, позволяющие осуществлять перестроения. В этих моделях обновление состояния происходит в два этапа:

1. Проверяется необходимость и возможность смены полосы для каждого автомобиля. Если условия осуществления манёвра соблюдены, происходит перестроение машины на соседнюю полосу. В зависимости от ширины дороги и текущей полосы движения транспортного средства, перемещение может производиться как вправо, так и влево.

2. На каждой полосе движения независимо от остальных происходит обновления положения движения транспортных средств в соответствии с правилами используемой однополосной модели.

Этапы проводятся последовательно, поэтому, полученная после смены полосы движения конфигурация, используется для вычисления новых скоростей.

Первая формулировка такой модели [9] допускала при образовании определённой конфигурации транспортных средств появление так называемого “эффекта пинг-понга”, который заключается в одновременном изменении полосы движения несколькими автомобилями. В формулировке модели [11] эта проблема была решена путём введения вероятностного элемента в правило принятия решения о смене полосы.

Условия выполнения смены полосы в двух полосной модели:

$$\begin{aligned}g_i(t - 1) &< d(t - 1) \\g_{oi}(t - 1) &< d_o(t - 1) \\g_{obi}(t - 1) &< d_{ob}(t - 1) \\f(t) &< p_c.\end{aligned}\tag{16}$$

Переменные g_{oi} и g_{obi} соответствуют расстоянию до других участников дорожного движения на смежной полосе, находящихся впереди и позади относительно рассматриваемого автомобиля. Параметрами d_o и d_{ob} задаётся расстояние до других машин впереди и позади транспортного средства, при наличии которых и принимается решение о смене полосы. Заданные условия помогают обеспечить безопасное перестроение: первое условие позволяет избежать столкновений с впередиидущей машиной на своей полосе, а следующие два – с машинами на смежных полосах. Вероятность p_c вносит элемент случайности в решение водителя об осуществлении манёвра.

Многополосные модели, состоящие из трёх или более полос, при применении к ним набора правил для двух полосной модели испытывают проблему со столкновениями машин так называемого конфликта распределения [7]. Коллизии возникают, когда два автомобиля передвигаются по разделённым одной полосой движения частям

многополосной дороги, имеют одну скорость и координату n и синхронно принимают решение о перестроении на свободную полосу между ними. Избежать подобных ситуаций можно двумя способами:

- 1) предоставлением приоритета одному из претендующих автомобилей;
- 2) введением очерёдности правых и левых перестроений, например, разрешая смену полосы на правую только по чётным итерациям, а на левую – по нечётным.

2.4. Выводы по второму разделу

В этом разделе рассмотрены различные виды моделей клеточных автоматов, для систем моделирования дорожного движения. В моделях рассмотрены основные принципы дорожного движения, позволяющие повысить точность моделирования реальной дорожной обстановки на участках многополосных дорог с возможностью перестроения.

3. ОПИСАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ

3.1. Алгоритм

3.1.1. Общие сведения

В этом разделе представлена разработанная микромодель потока автомобилей на основе стохастического многополосного транспортного клеточного автомата. Приведены особенности правил обновления автомата, показаны принципы моделирования УДС.

Модель использует сетку размером $M \times N$, где M – число полос дороги, а N – её длина в ячейках. Длина одной ячейки l_c будет равняться R . В работах [2,3] автор предлагает выражать l_c метрах и принять её значение равным 5,5 м. l_c является базовым параметром модели, определяя её разрешающую способность. Под разрешающей способностью понимается степень дискретизации линейного пространства автоматом, т. е. соответствие размера отдельной ячейки участку дороги определённой длины. На этом массиве в произвольном порядке будут располагаться транспортные средства. Позиция машин в массиве задаётся двумя индексами: n и m (n, m) для полосы и расстояния от начала соответственно.

Максимальная скорость автомобилей v_{max} устанавливает максимально допустимую скоростью движения на участке дороги (например, ограничение скорости движения по населённому пункту – 60 км/ч).

Обновление клеточного автомата будет производиться в два этапа:

1. Определяется необходимость и возможность изменения полосы движения для каждого автотранспортного средства. Если смещение необходимо и осуществимо, машина перемещается в бок. Перемещение может выполняться как на левую, так и на правую полосу – например, при перестроении из средней полосы трёхполосной дороги. Поэтому, оценка необходимости и возможности манёвра ведётся на обоих смежных полосах,

если положение автомобиля позволяет это сделать. Этап реализуется на основе текущей конфигурации в виде параллельного обновления.

2. Каждая полоса движения независимо от других обновляется на основании правил однополосной модели, используя конфигурацию, полученную в результате первого этапа.

На скорость движения и решение о смене полосы оказывают влияние более медленные машины, двигающиеся впереди и препятствия.

Манёвр перестроения для ситуаций не обязывающих водителя к перестроению происходит с вероятностью p_c . Разделение итераций на чётные и нечётные позволяет избежать “конфликта распределения” приводящего к одновременному перестроению машин на среднюю полосу движения и грозящего возможностью столкновения.

Введение элемента вероятности в принятие решения о смене полосы обеспечивает отсутствие так называемого “эффекта пинг-понга” (см. 2.3).

3.1.2. Определение необходимости смены полосы движения

Необходимость перестроения на левую полосу CLN или правую CRN описывается следующим набором условий:

1. Если впередиидущий автомобиль движется медленнее или стоит:

$$\text{If } g_i(t - 1) < v_i(t - 1) \text{ and } v_i(t - 1) > v_{i+1}(t - 1)$$

$$\text{then CLN1} = \text{TCRN1} = \text{T}. \quad (17)$$

2. Если значение функции оценки состояния дорожного покрытия для соседней полосы на расстоянии d_q больше, чем для текущей, то есть на соседней полосе состояние дорожного покрытия лучше, либо на текущей полосе движения встречается препятствие:

$$\text{if } q_s(m_i(t-1) - 1, n_i(t-1), d_q) > q_s(m_i(t-1), n_i(t-1), d_q)$$
$$\text{then CLN2} = \text{T.}$$
$$\text{if } q_s(m_i(t-1) + 1, n_i(t-1), d_q) > q_s(m_i(t-1), n_i(t-1), d_q)$$
$$\text{then CRN2} = \text{T.} \tag{18}$$

3. Смена полосы необходима при выполнении условий:

$$\text{if } ((\text{CLN1 and CLN2}) \text{ or CLN2) or}$$
$$(\text{CLN1 and } q_s(m_i(t-1) - 1, n_i(t-1), d_q) > 0)$$
$$\text{then CLN} = \text{T.}$$
$$\text{if } ((\text{CRN1 and CRN2}) \text{ or CRN2 or}$$
$$(\text{CRN1 and not CLN and } q_s(m_i(t-1) + 1, n_i(t-1), d_q) > 0))$$
$$\text{then CRN} = \text{T.} \tag{19}$$

Здесь q_s – функция оценки состояния дорожного покрытия, оперирующая тремя аргументами: полосой движения m , текущей ячейкой n и дистанцией контроля состояния дороги d_q (примем значение этого параметра равным 5 ячейкам). Значение функции зависит от наличия на дороге препятствий, которые приравниваются к отсутствию дороги и имеют значение нуль, обращая при этом в нуль всю функцию, и повреждённых элементов, у которых индекс состояния дорожного покрытия меньше чем у обычных сегментов дороги. Предпочтение отдаётся полосе m , для которой значение q_s максимально.

3.1.3. Определение возможности смены полосы движения

Возможность перестроения на левую полосу CLN или правую CRN определяется следующими условиями:

1. На соседней полосе перед автомобилем на расстоянии, большем g_i , нет других машин:

$$\text{if } g_{li}(t - 1) > g_i(t - 1) \text{ then } CLO1 = T. \quad (20)$$

По установленным правилам дорожного движения [1] даже при наличии необходимости и возможности сменить полосу движения на правую при наличии перед машиной более медленного транспортного средства, значение CRO будет ложно, поскольку обгоны справа запрещены. С другой стороны, если скорость машины впереди равна нулю, то CRO может принять значение истины, поскольку в таком случае имеет место манёвр объезда:

$$\begin{aligned} \text{if } g_{ri}(t - 1) > g_i(t - 1) \text{ and } v_{i+1}(t - 1) = 0. \\ \text{then } CRO1 = T. \end{aligned} \quad (21)$$

2. На соседней полосе позади на расстоянии $(v_{\max} + 1)$ нет другого автомобиля, которому текущая машина может помешать при перестроении. Для исключения столкновений в результате применения правила “превышения скорости” (определение приведено в следующем пункте) к максимально допустимой скорости на участке дороги прибавляется единица:

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

$$\text{if } q_{rb_i}(t - 1) > v_{\max} + 1 \text{ then } CRO2 = T. \quad (22)$$

3. На смежной полосе впереди на расстоянии d_q индекс эксплуатационного состояния дороги отличен от нуля (т. е. на нём нет препятствий):

$$\text{if } q_s(m_i(t-1) - 1, n_i(t-1), d_q) > 0$$

$$\text{then CLO3} = T.$$

$$\text{if } q_s(m_i(t-1) + 1, n_i(t-1), d_q) > 0$$

$$\text{then CRO3} = T. \quad (23)$$

4. Смена полосы на левую (CLO) или правую (CRO) возможна при выполнении условий:

$$\text{if CLO1 and CLO2 and CLO3 and } m_i(t-1) - 1 \geq 0$$

$$\text{then CLO} = T.$$

$$\text{if CRO1 and CRO2 and CRO3 and } m_i(t-1) - 1 \geq 0$$

$$\text{then CRO} = T. \quad (24)$$

В выражениях правила 4, помимо необходимости выполнения всех условий возможности смены полосы, с помощью индекса m_i осуществляется проверка выезда автомобиля за пределы рассматриваемой области, ограниченной отрезком $[0, M - 1]$.

3.1.4. Перестроение

При соблюдении всех условий необходимости и возможности смены полосы движения, происходит перестроение влево или вправо. Высказывания CLT и CRT – обозначают стремления водителя к движению по

одной из смежных полос игнорируя вероятность перестроения, что может быть необходимо водителю при наличии препятствия, или может быть задействовано в усложнённой модели для перестроения при подготовке к повороту:

1. Перестроение влево:

$$\begin{aligned} &\text{if (CLN and CLO) and (f(t) < } p_c \text{ or CLT) and (t mod 2 = 0)} \\ &\text{then } m_i(t) = m_i(t - 1) - 1. \end{aligned} \quad (25)$$

2. Перестроение вправо:

$$\begin{aligned} &\text{if(not CLN and CRN and CRO) and (f(t) < } p_c \text{ or CRT) and (t mod 2 = 0)} \\ &\text{then } m_i(t) = m_i(t - 1) + 1. \end{aligned} \quad (26)$$

Манёвр перестроения происходит с вероятностью p_c (или при явно заданном с помощью переменных CLT или CRT стремлении машины двигаться по определённой крайней полосе). Разделение перестроений на чётные и нечётные, с помощью бинарного оператора mod, позволяет разделять итерации для левых и правых перестроений – это исключает появление “конфликта распределения”. Введение элемента вероятности в принятие решения о смене полосы обеспечивает отсутствие “эффекта пинг-понга” (см. 2.3).

3.1.5. Передвижение

Передвижение машин по сетке автомата производится вышеописанным правилам движения машин на однополосной модели, с учётом локальных скоростных ограничений или рекомендованных скоростей для определённых участков дороги.

Следует также принять во внимание возможности, представленные в одно- и многополосных моделях с правилом медленного старта, поскольку это дополнение позволяет более адекватно отразить динамику потока автотранспорта.

Определение новой скорости и перемещение автомобилей происходит по следующим правилам:

1. Ускорение:

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

$$\text{if } f(t) < p_{\text{sts}} \text{ and } v_i(t-1) = 0 \text{ and } g_i(t-1) \leq d_{\text{sts}}$$

$$\text{then } v_i(t) = 0. \quad (27)$$

2. Торможение:

$$b_i = 0$$

$$\text{if } f(t) < p_{\text{sa}} \text{ and } v_i(t-1) > 0 \text{ and } v_{i+1}(t-1) > 0 \text{ and}$$

$$g_i(t-1) \leq d_{\text{sa}} \text{ and } (b_{i+1}(t-1) = 1 \text{ or } v_{i+1}(t-1) < v_i(t-1))$$

$$\text{then } v_i(t) = v_{i+1}(t-1), b_i(t) = 1. \quad (28)$$

$$\text{if } v_i(t) > g_i(t-1) \text{ then } v_i(t) = g_i(t-1), b_i(t) = 1. \quad (29)$$

3. Случайное замедление:

$$\text{if } (f(t) < p \text{ and } (v_i(t-1) > 1 \text{ or SSA}))$$

$$\text{then } v_i(t) = \max(v_i(t) - 1, 0). \quad (30)$$

4. Превышение скорости:

$$\text{if } f(t) < p_s \text{ and } v_i(t-1) = v_{\max} \text{ and } v_i(t-1) + 1 < g_s(t-1)$$

$$\text{then } v_i(t) = v_i(t - 1) + 1. \quad (31)$$

5. Движение:

$$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t). \quad (32)$$

Выражение (27) задействует правило медленного старта с вероятностью p_{sts} и при условии, что скорость текущей машины равна нулю и дистанция до впереди идущего транспортного средства g_i не больше расстояния d_{sts} .

С помощью выражения (28) работает правило упреждающего изменения скорости: с вероятностью p_{sa} , при выполнении условий, что автомобиль движется, а впереди идущая машина, находящаяся в пределах дистанции d_{sa} , движется с меньшей скоростью или тормозит, текущий автомобиль изменяет свою скорость соответственно со скоростью ведущего. Если полученное значение скорости автомобиля превышает расстояние до впереди идущей машины g_i , то, согласно выражению (3), во избежание столкновения скорость принимается равной этому расстоянию, иначе остаётся неизменной.

В работе [2] для торможения было предложено ввести параметр d_{sa} , который представляет собой продольный динамический габарит машины. Это пространство равно сумме длины машины и интервала между передним и задним транспортными средствами, следующими друг за другом. При наличии между транспортными средствами этого интервала водитель имеет возможность двигаться, не подвергаясь вынужденному замедлению ввиду помех впереди.

В соответствии с правилом 3, с вероятностью p автомобиль может уменьшить свою скорость на единицу (30), это вносит стохастический элемент в поведение системы. Параметр SSA имеет значение истины, что предотвращает случайную остановку машины, двигающейся со скоростью 1 ячейка в секунду.

Правило 4 вносит эффект превышения максимально разрешённой скорости с заданной вероятностью p_s , оно отражает случайные превышения

скорости или поведение несознательной части водителей, по каким-либо причинам нарушающих установленный правилами скоростной режим. Внесение этого правила позволяет более адекватно отражать скорость потока машин [4].

Правило 5 служит для перемещения автомобиля на количество ячеек, равное v_i (32).

3.1.6. Блок схема алгоритма

Блок схема алгоритма приведена на рисунке 3.1.

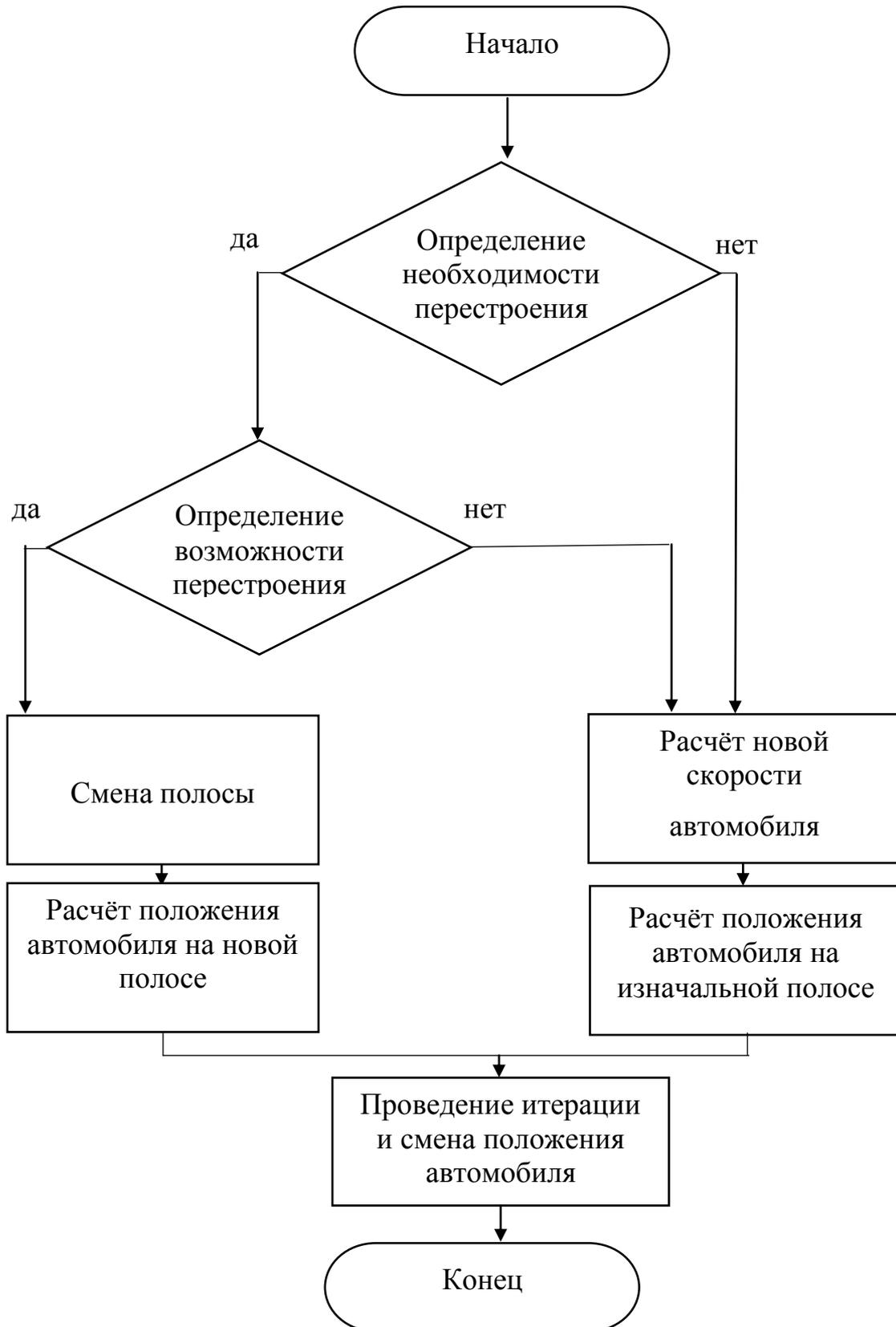


Рисунок 3.1 – Блок схема принятия решения о перемещении машины

3.2. Результаты модели

При моделировании использовалось поле клеток с параметрами $M=3$, $N=20$. Белые клетки соответствуют незанятому дорожному покрытию стандартного состояния. Серые клетки задаются для указания зон с повреждённым или некачественным дорожным покрытием. Красные клетки соответствуют непреодолимым препятствиям. Синими клетками обозначены автотранспортные средства, передвигающиеся по заданному дорожному участку. Цифры на синих клетках соответствуют скорости машин, то есть количеству клеток, которое они пройдут при следующей итерации.

3.2.1. Моделирование обгона

На рисунках 3.2–3.4 показана модель совершения манёвра перестроения и дальнейшего движения автомобиля, движущегося с более высокой скоростью, из-за случайной потери скорости впереди идущего автомобиля. После совершения смены полосы, скорости автомобилей становятся одинаковыми, и они продолжают двигаться по разным полосам с одинаковой скоростью.

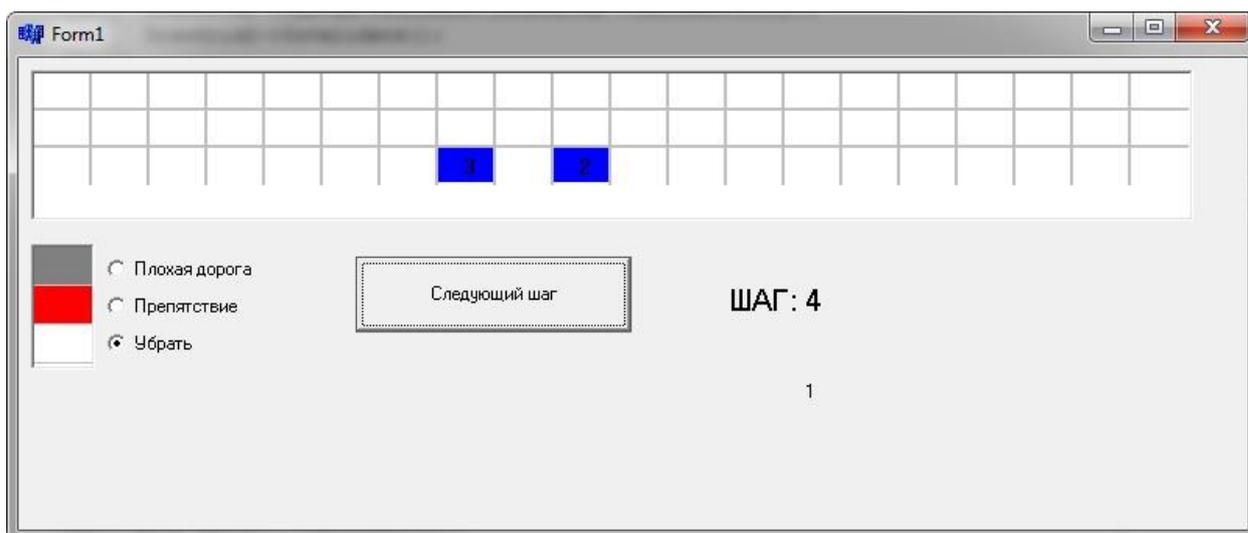


Рисунок 3.2 – Первый этап модели обгона

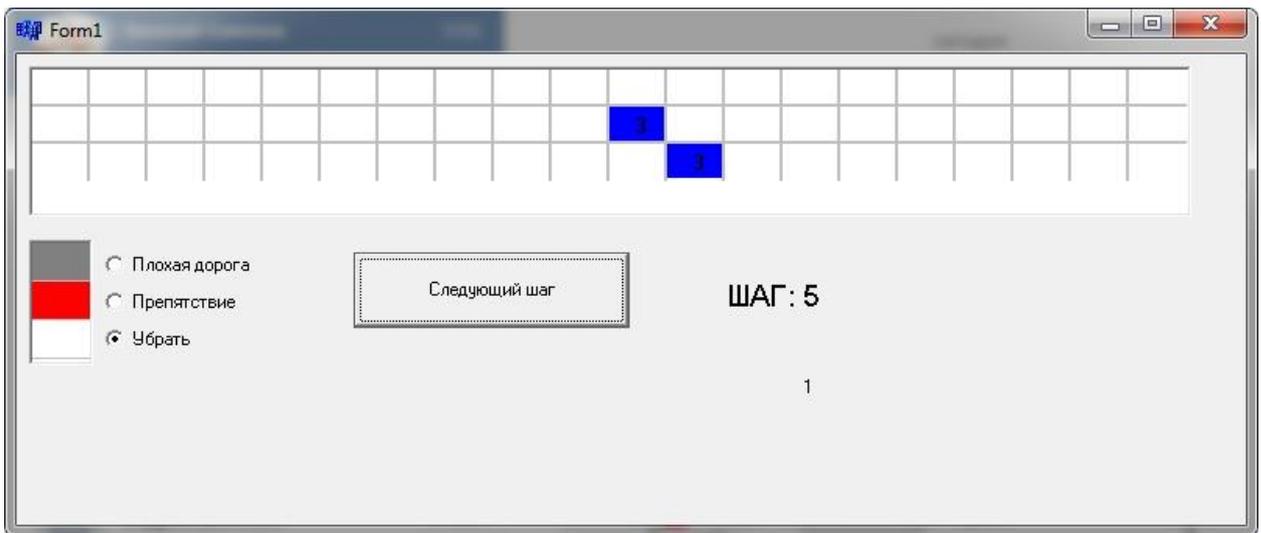


Рисунок 3.3 – Второй этап модели обгона

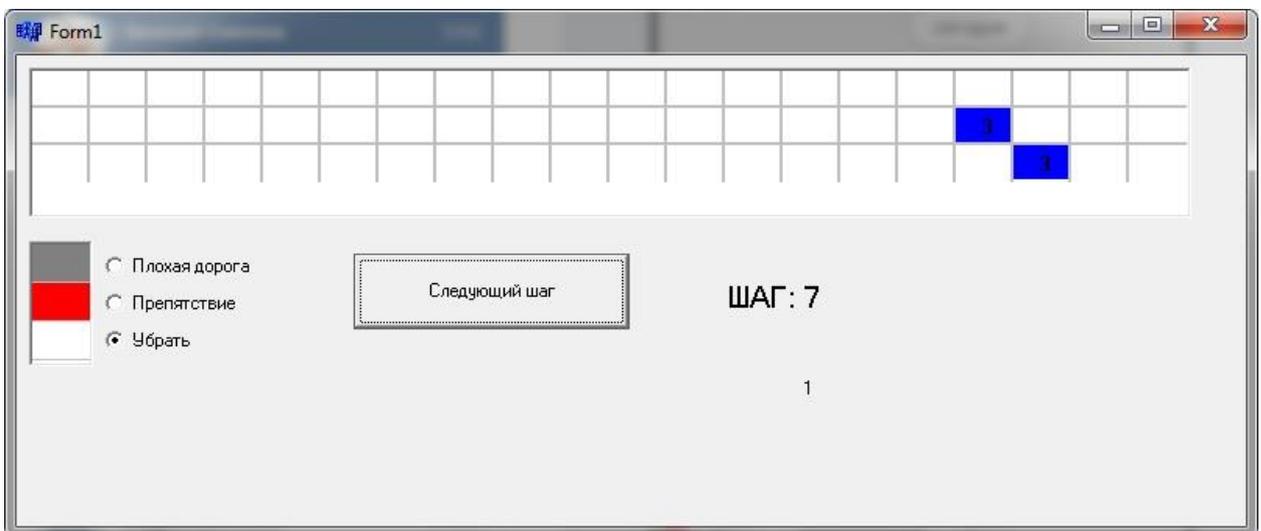


Рисунок 3.4 – Третий этап модели обгона

3.2.2. Моделирования объезда препятствия

На рисунках 3.5–3.7 представлена модель объезда препятствия. При приближении к препятствию на расстояние ближе пяти клеток автомобили начинают искать возможность к перестроению. Не встречая никаких препятствий, они свободно сменяют полосу движения.

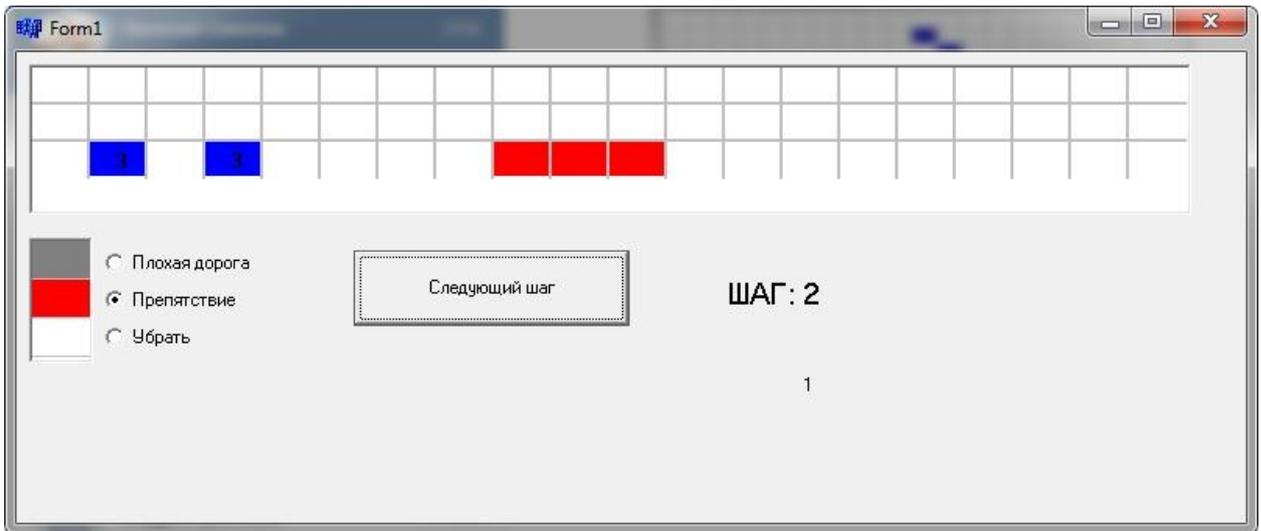


Рисунок 3.5 – Первый этап моделирования объезда препятствия

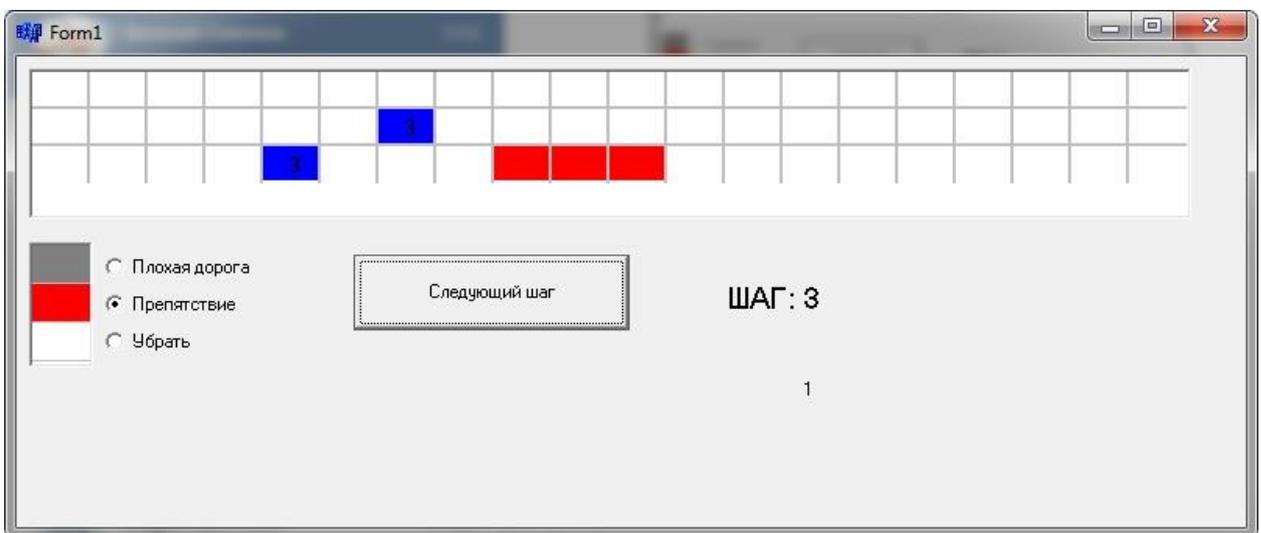


Рисунок 3.6 – Второй этап моделирования объезда препятствия

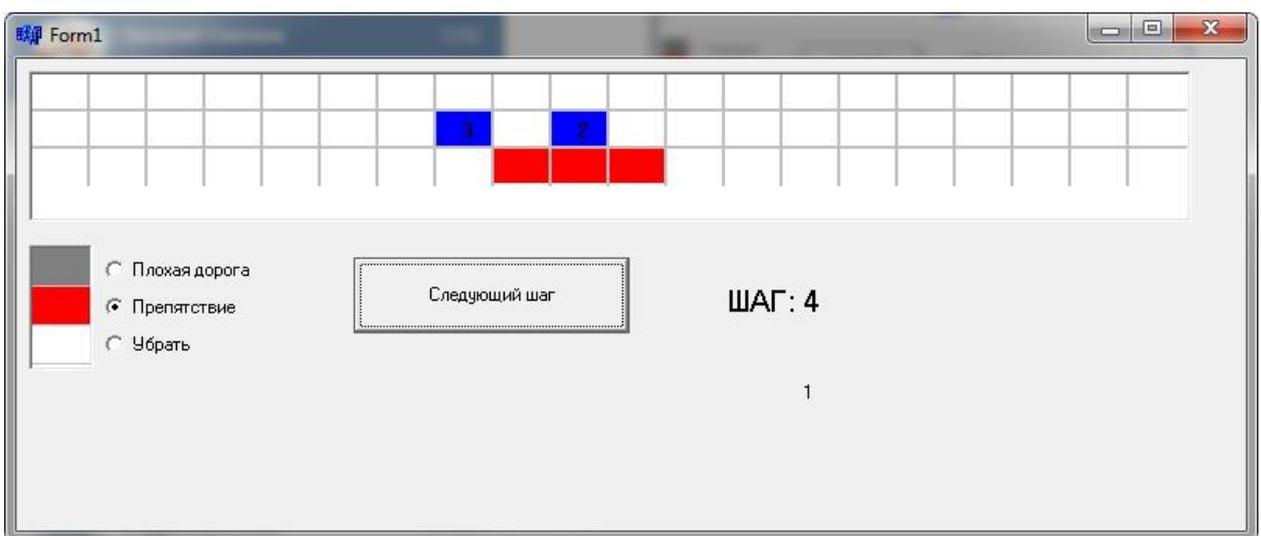


Рисунок 3.7– Третий этап моделирования объезда препятствия

3.2.3. Ряд перестроений

На рисунках 3.8–3.10 представлен ряд перестроений, перестроения с нижней и средней линий вызваны подъездом к препятствию. Перестроения с верхней линии вызваны плохим состоянием дорожного покрытия.

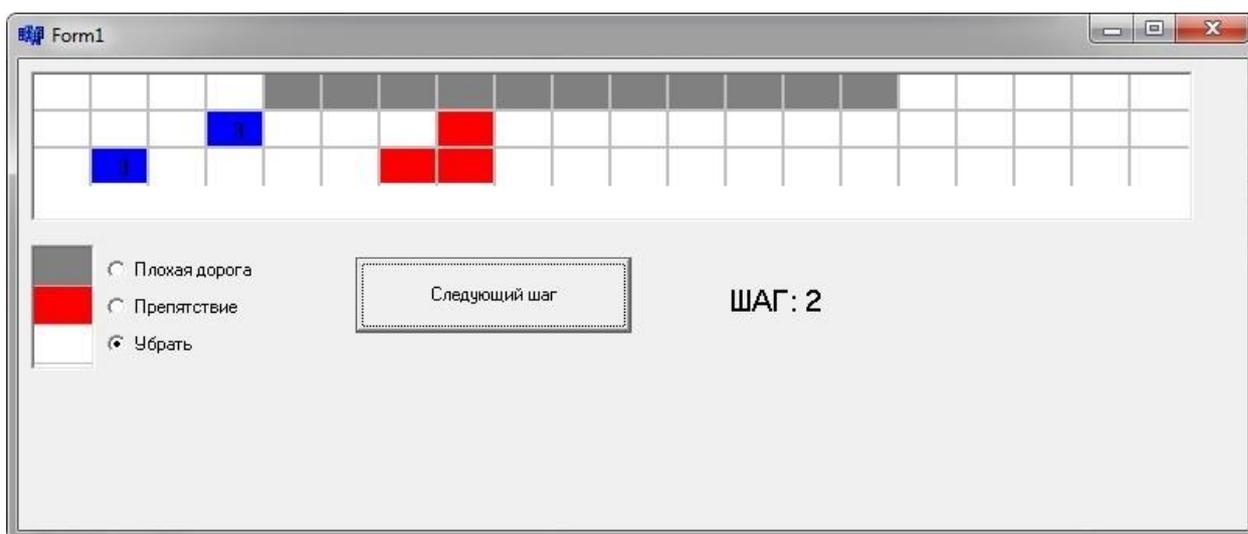


Рисунок 3.8 – Первый этап ряда перестроений

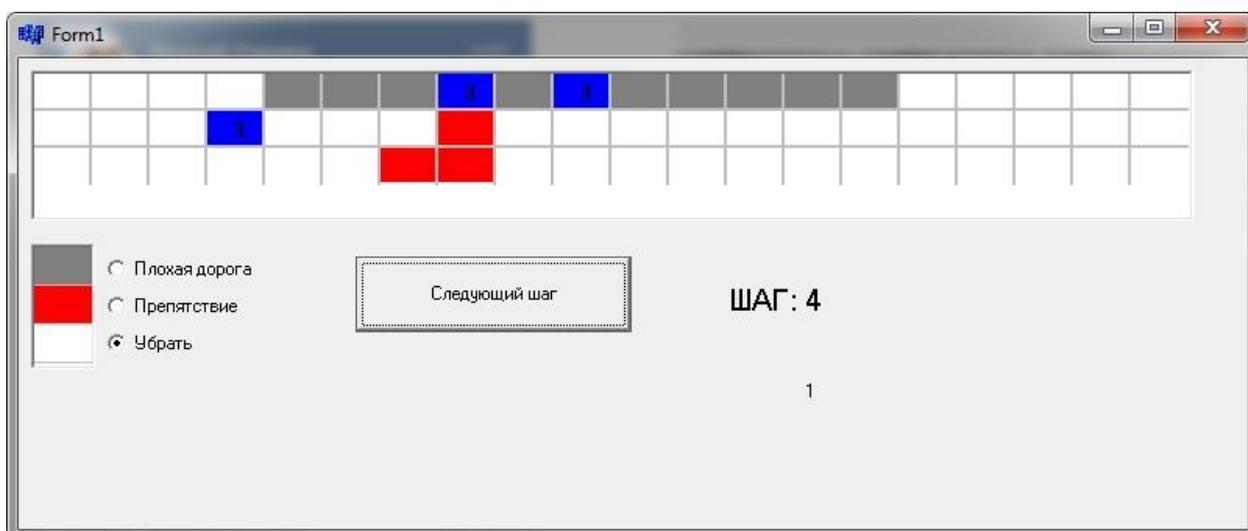


Рисунок 3.9– Второй этап ряда перестроений

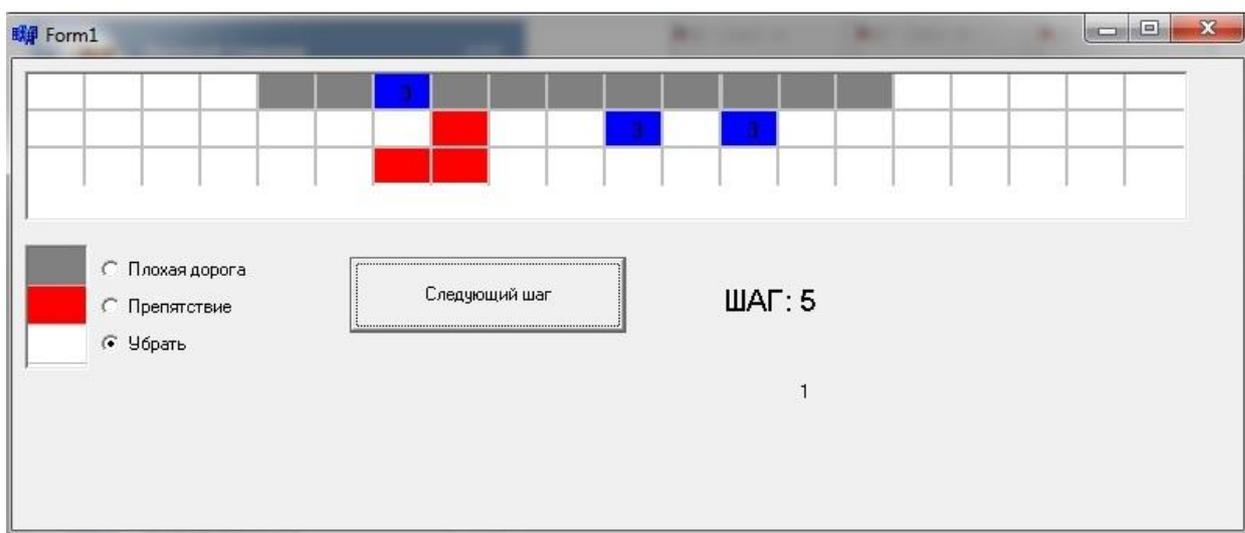


Рисунок 3.10 – Третий этап ряда перестроений

3.3. Выводы по третьему разделу

В этом разделе на практике применены знания, полученные в ходе исследования моделирования дорожного движения с помощью клеточных автоматов. Основная цель раздела заключалась в реализации модели, способной объединить в себе рассмотренные принципы движение автотранспортных средств. В результате была разработана дискретная модель, использующая рассмотренные приёмы для моделирования различных дорожных ситуаций на рассматриваемом участке многополосной дороги. На основании построенной модели была написана программа, реализующая алгоритм дискретного клеточного автомата и проведена наглядная демонстрация работы программы на примере некоторых сложных дорожных ситуаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная выпускная квалификационная работа посвящена исследованию методов построения математических моделей дорожного движения. А именно, целью работы было построение дискретной модели дорожного движения.

В соответствие с этой целью в первой части работы проведен обзор различных подходов в области моделирования дорожного движения. Особое внимание уделено дискретным моделям, а именно, моделям, построенным с помощью теории клеточных автоматов.

Во второй части построена дискретная математическая модель дорожного движения, основанной на стохастическом транспортном клеточном автомате. Приведено формальное математическое описание модели.

При работе над выпускной квалификационной работой были решены следующие задачи:

- 1) выполнен обзор существующих методов моделирования дорожного движения;
- 2) исследованы методы, применяемые для построения дискретных моделей;
- 3) построены дискретные математические модели дорожного движения на основе клеточных автоматов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, А.П. Правила дорожного движения 2016 с иллюстрациями с самыми последними изменениями / А.П. Алексеев. - М.: Эксмо, 2016. - 160 с.
2. 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:
3. Долгушин Д. Ю. Моделирование транспортных потоков города на основе клеточных автоматов / Д. Ю. Долгушин, Т. А. Мызникова // Вестник СибАДИ. – Омск: СибАДИ, 2008.
4. Дрю А. Теория транспортных потоков и управление ими. “Транспорт”, 1972 г., стр. 1-424
5. Иносэ Х. Управление дорожным движением / Х. Иносэ, Т. Хамада; под ред. М. Я. Блинкина: пер. с англ. – М.: Транспорт, 1983. – 248 с.
6. Лобанов А. И. Модели клеточных автоматов / А. И. Лобанов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2010. – Т.2, №3. – С. 273–293.
7. Семенов В.В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса – М., 2004. – 44 с.
8. Тоффоли Т. Машины клеточных автоматов/ Т. Тоффоли, Н. Марглоус;
9. Nagatani T. Self-organization and phase transition in traffic-flow model of a two-lane roadway // J. Phys. A: Math. Gen. 26. 1993. P. 781.
10. Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic // J. Phys. I France. 1992. Vol. 2. Pp. 2221–2229.
11. Rickert M., Nagel K., Schreckenberg M., Latour A. Two lane traffic simulations using cellular automata // Physica A. 1996.–October. Vol. 231, no. 4.