



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

Препринты ИПМ • Препринт № 98 за 2022 г.



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

А.А. Чечина, Н.Г. Чурбанова,
М.А. Трапезникова, А.В. Ермаков,
М.С. Герман, А.А. Люпа

Клеточные автоматы в
приложении к
моделированию
транспортных потоков

Статья доступна по лицензии
[Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Клеточные автоматы в приложении к моделированию транспортных потоков / А.А. Чечина [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2022. № 98. 12 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2022-98>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2022-98>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

А.А.Чечина, Н.Г.Чурбанова, М.А. Трапезникова,
А.В. Ермаков, М.С. Герман, А.А. Люпа

Клеточные автоматы в приложении
к моделированию транспортных
ПОТОКОВ

Москва — 2022

***Чечина А.А., Чурбанова Н.Г., Трапезникова М.А., Ермаков А.В., Герман М.С.,
Люпа А.А.***

Клеточные автоматы в приложении к моделированию транспортных потоков

Препринт обобщает опыт математического моделирования транспортных потоков на городских дорожных сетях с использованием теории клеточных автоматов. Предлагаемая многополосная модель позволяет описывать движение по сложным дорожным сетям и учитывает водителей с различными стратегиями смены полосы движения. Модель положена в основу комплекса программ, с помощью которого могут быть получены различного рода осреднённые характеристики трафика, такие, например, как пропускная способность перекрестка. Кроме того, программный комплекс позволяет прогнозировать последствия различных решений, касающихся изменений дорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: математическое моделирование, транспортные потоки, микроскопические модели, клеточные автоматы.

***Antonina Alexandrovna Chechina, Natalia Gennadievna Churbanova,
Marina Alexandrovna Trapeznikova, Alexey Viktorovich Ermakov,
Mikhail Sergeevich German, Anastasiya Alexandrovna Lyupa***

Cellular automata in the application to the modeling of traffic flows

The preprint summarizes the experience of mathematical modeling of traffic flows on urban road networks using the theory of cellular automata. The proposed multi-lane model allows the description of traffic on complex road networks and takes into account drivers with different lane change strategies. The model is the basis for a software package that can be used to obtain various average traffic characteristics, such as, for example, the throughput of an intersection. In addition, the software package allows you to predict the consequences of various decisions regarding changes in the road infrastructure.

Key words: mathematical modeling, traffic flows, microscopic models, cellular automata.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 20-07-00528-А.

Введение

После того, как в 1992 году К. Нагель и М. Шрекенберг предложили применить теорию клеточных автоматов (CellularAutomata – CA) фон Неймана к моделированию транспортных потоков [1], многие ученые следуют этому подходу в исследованиях динамики транспорта (см., например, [2–9]). Привлекательность данного подхода объясняется его простотой и гибкостью. Модели клеточных автоматов можно считать подклассом микроскопических моделей. Их основными преимуществами являются следующие особенности:

- учет движения каждого отдельного автомобиля,
- возможность моделирования разреженного потока,
- возможность описания различного поведения водителей.

В настоящей работе рассматривается оригинальная многополосная модель, основанная на одномерной СА-модели Нагеля-Шрекенберга. В созданной модели алгоритм поступательного движения по дороге дополнен правилами перестроения. Созданный программный комплекс применим для настройки оптимальных режимов работы светофоров на сложных участках дорог и для имитации последствий дорожно-транспортных происшествий, что может быть необходимо для онлайн-моделирования городского трафика в режиме реального времени с целью разработки мер по предотвращению пробок, а также для оценки эффективности этих мер.

В комплекс вошли также алгоритмы правил, описывающих различные стратегии поведения водителей. Подход на основе теории клеточных автоматов очень удобен для описания стратегий водителей, включающих ситуации дискретного выбора, поскольку основан не на уравнениях в частных производных, а на логических алгоритмах и условиях «если – то». Моделирование водительских стратегий и принятия решений во время движения в потоке – область, в настоящее время мало исследованная и потому представляющая интерес.

Также до сих пор при решении задач транспортного моделирования редко встречается выполнение расчетов на высокопроизводительных системах, что, безусловно, является важным для масштабных расчетов на городских сетях.

Следует отметить, что современные вычислительные системы позволяют выполнять крупномасштабные расчёты движения автотранспорта на дорожных сетях больших городов, в том числе и с применением моделей клеточных автоматов.

Разработанная модель и ее численная реализация

Модели транспортных потоков, основанные на теории клеточных автоматов, полностью дискретны – как по пространству, так и по времени. Дорога делится на равные ячейки, каждая ячейка может либо содержать транспортное средство, либо быть пустой. Расстояние вдоль и поперек дороги

измеряется в количестве клеток. Количество клеток поперёк дороги равно числу полос. Шаг по времени обычно равен 1 секунде, скорость транспортного средства – количеству клеток, которое транспортное средство может преодолеть за один временной шаг. На каждом временном шаге выполняется обновление состояния ячеек по определенным логическим правилам.

В первую очередь проверяются условия смены полосы движения:

- автомобиль находится в зоне, где разрешена смена полосы движения;
- смена полосы движения приводит к увеличению скорости (уменьшению плотности) или необходима для достижения пункта назначения;
- целевая ячейка пуста;
- условие безопасности выполнено – на целевой полосе расстояние позади целевой клетки больше или равно максимальной скорости, а впереди – больше или равно скорости рассматриваемого транспортного средства;
- смена полосы движения происходит с некоторой вероятностью.

Далее движение происходит по выбранной полосе в соответствии с правилами Нагеля-Шрекенберга.

Комплекс программ, реализующий предложенную модель, имеет модульную структуру. Вычислительный модуль написан на C/C++ и использует библиотеку Glut для отладочной визуализации, а также библиотеку MPI для параллельных вычислений. Вычислительный модуль организован в виде отдельных подпрограмм для моделирования трафика на дорожных элементах разных типов параллельно с обменом данными на границах элементов.

В качестве основных элементов дороги можно рассматривать такие участки, как:

- регулируемый и нерегулируемый Т-образный перекресток;
- регулируемый и нерегулируемый Х-образный перекресток;
- прямая дорога (с пешеходным светофором и без него);
- участок с въездом (например, въезд на автомагистраль);
- прямая дорога с расширением/сужением;
- разворот.

Основные элементы представлены на рис. 1.

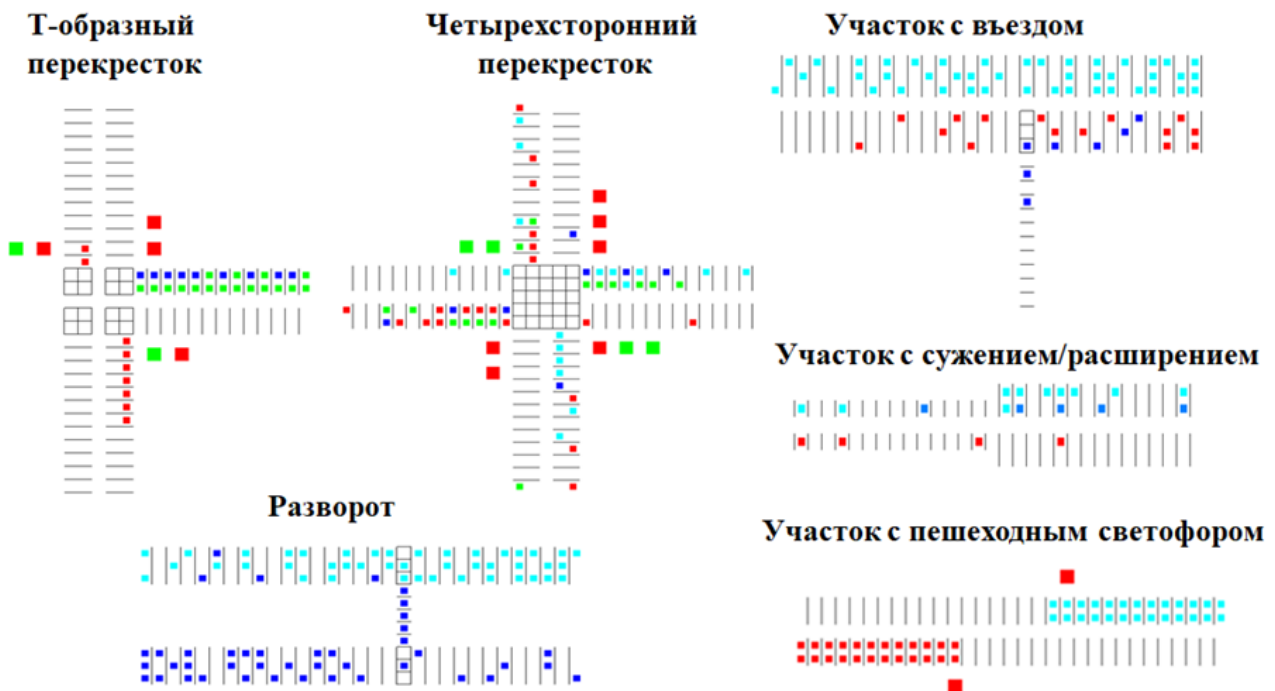


Рис. 1. Расчеты на основных элементах дорожной сети

На рисунках меньшие квадраты представляют автомобили, большие квадраты – светофоры. Автомобили помечены разными цветами в зависимости от их целей (полосы назначения на выезде с дорожного элемента). Каждый тип дороги может иметь любое количество полос.

Предлагаемый подход имеет как достоинства, так и недостатки: с одной стороны, простые логические алгоритмы позволяют учитывать различные характеристики автомобильного трафика, например, стратегии вождения; с другой стороны, дискретные скорость и ускорение вводят в модель определенные ограничения. Кроме того, фиксированный размер ячейки (обычно 7,5 метра) затрудняет моделирование неоднородного трафика, включающего длинные транспортные средства, такие как грузовики и автобусы. Тем не менее, эти трудности можно преодолеть (по крайней мере, до определенного момента) для задач, где это необходимо.

Численная реализация модели представлена в виде оригинального пакета программ, названного CAM-2D – «CellularAutomata Model – 2-Dimensional» («Модель клеточных автоматов – 2-мерная») [10]. Он состоит из двух модулей: модуля пользовательского интерфейса и визуализации (для задания начальных условий и параметров модели, а также визуального представления результатов) и вычислительного модуля (для расчетов). Как было отмечено выше, вычислительный модуль содержит набор подпрограмм для моделирования движения на различных дорожных элементах. Из этих элементов мы можем создавать многочисленные дорожные сети, соответствующие реальным дорожным сетям города или района. Подробное описание логических

алгоритмов, положенных в основу программной реализации модели, можно найти в [11–12], специфика модуля визуализации отражена в [10, 13,14].

Пакет САМ-2D позволяет решать разнообразные транспортные проблемы, например, исследовать зависимость пропускной способности перекрестка от режимов светофора [11, 15], исследовать влияние поведенческих особенностей водителей на транспортный поток [12], исследовать влияние изменений в дорожной инфраструктуре на дорожную ситуацию и т.д.

Тестовые задачи

Для верификации предложенной модели был проведен ряд численных экспериментов.

Первая тестовая задача имитирует проблему аварий на дорогах. Аварии можно моделировать с помощью программы САМ-2D (см. рис. 2). Дорожно-транспортных происшествий вследствие каких-либо внутренних противоречий в модели быть не может из-за реализованных правил безопасности: машина всегда тормозит, приближаясь к препятствию или другому автомобилю в своей полосе, и не меняет полосу движения, если разрыв в целевой полосе недостаточен, чтобы перестроение было безопасно. Но можно смоделировать последствия аварии, что может быть полезно для онлайн-моделирования городского трафика в режиме реального времени, чтобы разработать мероприятия по предотвращению пробок и оценить эффективность этих мероприятий. Также можно оценить, насколько уменьшится пропускная способность дороги после аварии.

В реальности водителям присущи разные стили вождения: одни более решительные, легче перестраиваются, другие более осторожные, они ждут большего зазора для перехода на соседнюю полосу. Их поведение влияет на общую ситуацию на дороге. Чтобы отразить это, в модель были включены следующие типы водителей:

- «осторожные» водители – меняют полосу движения, только если разрыв между целевой ячейкой и первой занятой ячейкой выше по потоку больше, чем максимальная скорость;

- «агрессивные» водители – меняют полосу движения, если разрыв между целевой ячейкой и первой занятой ячейкой вверх по потоку больше фактической скорости транспортного средства, находящегося в первой занятой ячейке;

- «вежливые» водители – могут быть как осторожными, так и агрессивными. Процент вежливых водителей в системе может быть различным. Эти водители снижают скорость, если видят пробку перед препятствием или «узкое место» на соседней полосе. Если перед препятствием на соседней полосе есть водители, которые хотят перестроиться, вежливые водители останавливаются и пропускают их, даже если эти машины из другой полосы не могут двигаться сразу, потому что целевая ячейка занята другим автомобилем.

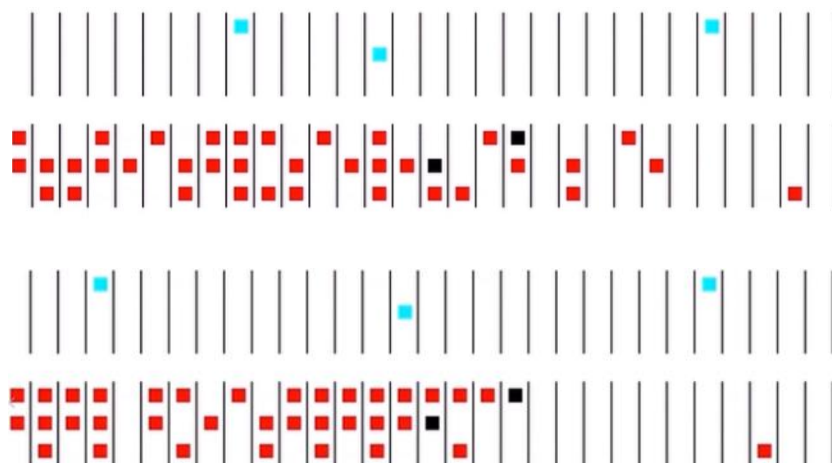


Рис. 2. Моделирование транспортного потока на прямой дороге с аварией с учетом разных стратегий водителей

Различие в поведении водителей, заложенное в модель, приводит к различным результатам. Так, на рис. 2 нижнее изображение отражает ситуацию, когда водители агрессивные, а верхнее изображение соответствует более осторожной манере вождения.

Подробнее об алгоритмах перестроения с учётом поведенческих особенностей см. в [12].

В качестве второго теста использовалась задача о движении по дороге с въездом, для которой были проанализированы поля скорости. Структуры трафика в реальных данных, полученных в разных точках мира, всегда схожи и выглядят как полосы меньшей скорости на пространственно-временных диаграммах (см. рис. 3). По оси Ox отложено время в часах и минутах, по Oy – расстояние в км, цвет соответствует скорости машин. Красные области имеют более низкие скорости, желтые области – более высокие скорости.

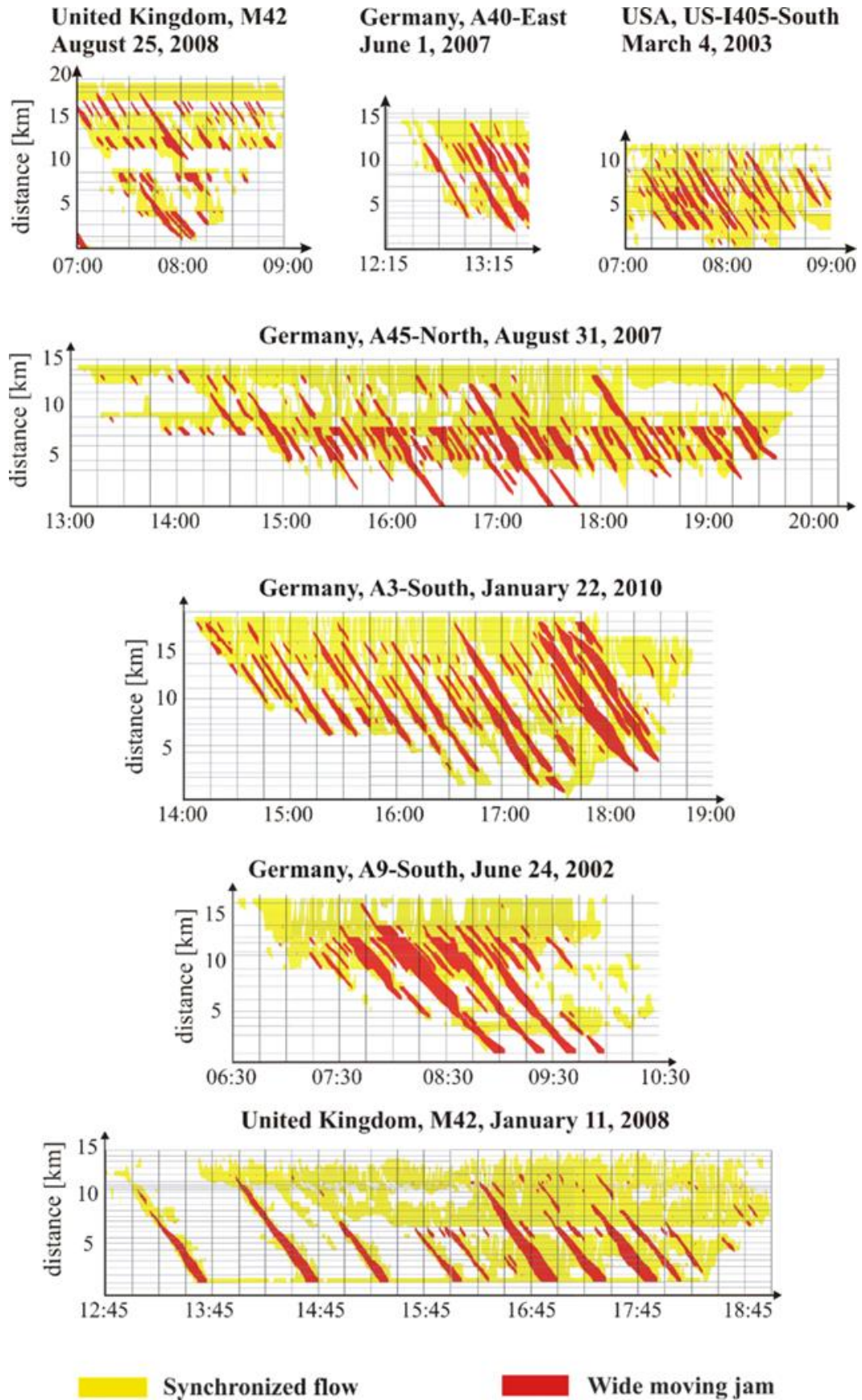


Рис. 3. Экспериментальные пространственно-временные диаграммы транспортных потоков, данные взяты из [16]

По мере накопления данных с датчиков и камер у исследователей появилась возможность изучать глобальные свойства транспортных потоков, анализируя картины пространственно-временных диаграмм, и сформулировать эмпирические правила, по которым формируются, эволюционируют и исчезают заторы на автомагистралях. В частности, Б. Кернер сформулировал теорию трех фаз [16], опираясь на обработанные данные с дорожных детекторов. Измерения проводились на автомагистралях с въездами и съездами, в результате чего были выявлены, в частности, следующие свойства:

- переходы между фазами транспортного потока происходят последовательно: сначала происходит переход F-S, от свободного потока к синхронизованному (то есть такому, где скорости еще высоки, хотя и ниже скоростей свободного движения, но автомобили вынуждены подстраивать свои скорости друг под друга), и лишь в синхронизованном потоке может произойти S-J переход – от синхронизованного потока к широкому движущемуся кластеру (проще говоря, к пробке);

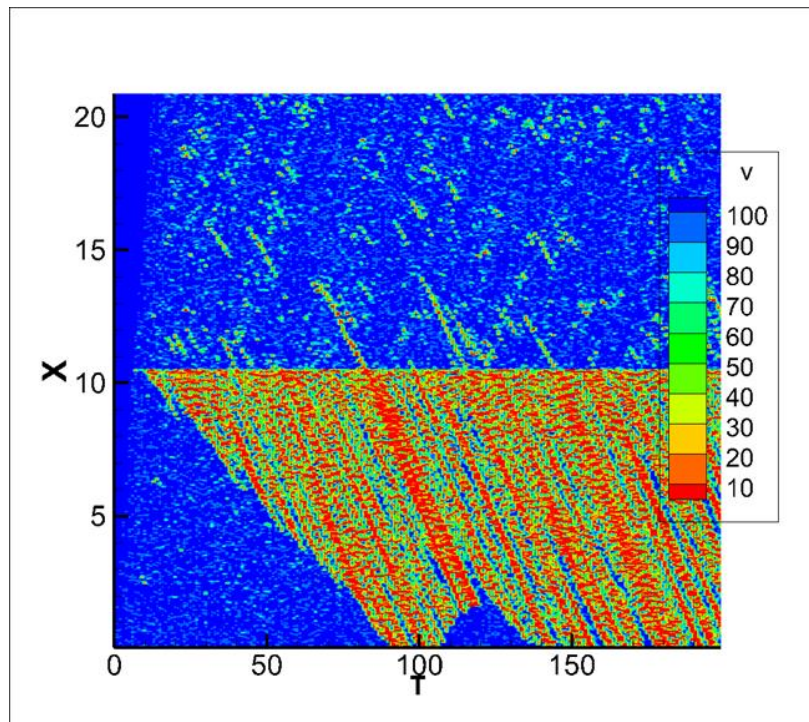
- передний фронт синхронизованного потока обычно фиксирован вблизи «бутылочного горла» (сужения, въезда на автомагистраль и т. п.), в то время как широкий движущийся кластер распространяется через любые состояния потока и все узкие места на дороге с постоянной скоростью;

- скорость распространения возмущений в транспортном потоке универсальна: в свободном потоке она немного меньше скорости свободного движения и составляет примерно 70 км/ч для автомагистралей, при этом возмущения распространяются вдоль потока, а в плотном потоке эта скорость составляет примерно -15 км/ч, возмущения распространяются против потока.

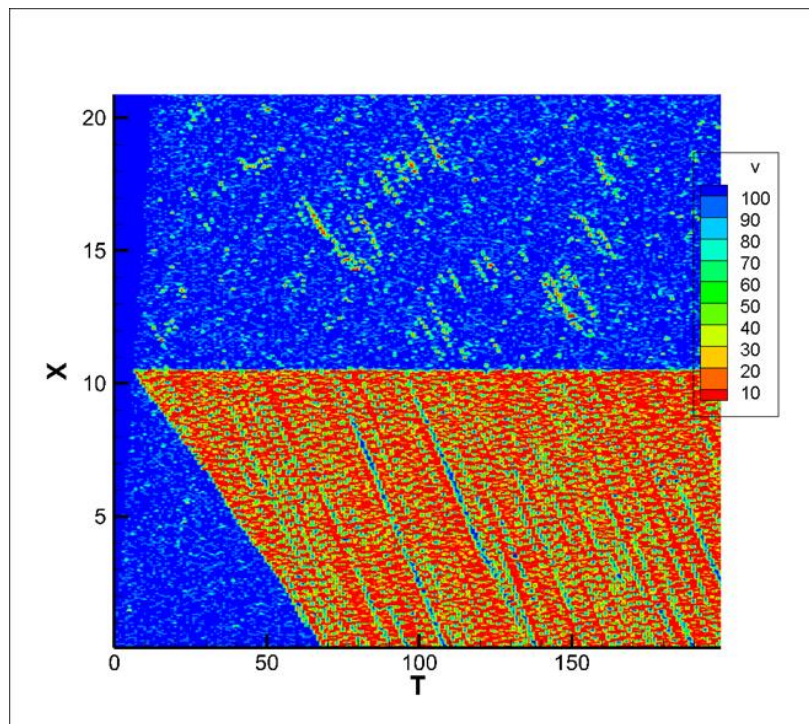
Иначе говоря, смотря на результаты моделирования, мы ожидаем, во-первых, увидеть структуры, похожие на полосы, как на рис. 3. Эти полосы должны быть параллельны, так как скорость распространения фазы J в синхронизованном потоке F – величина универсальная. Во-вторых, эти полосы не должны возникать сразу в свободном потоке, сначала поток должен стать синхронизованным.

Чтобы сравнить результаты тестовых расчётов с этими данными и посмотреть, воспроизводит ли модель указанные закономерности, была смоделирована следующая ситуация: пересечение двух дорог, одна из которых является главной дорогой с приоритетным проездом, а другая – второстепенной дорогой, где водителям приходится ждать достаточно большого разрыва в потоке на основной дороге, чтобы въехать. Рассчитывалась скорость автомобиля в разных точках дороги в разные моменты времени. Результаты были осреднены для облегчения сравнения (рис. 4). По оси Oх – время в минутах, по Oу – расстояние в км, цвет соответствует скорости транспортных средств. Красные регионы имеют более низкие скорости (перегруженный поток, пробки), синие области – более высокие скорости (свободный поток). Расстояние 10 км по Oу соответствует месту въезда. Поток на главной дороге и

на въезде на представленных рисунках различен, на диаграмме (а) поток меньше, чем на диаграмме (б).



(a)



(б)

Рис. 4. Пространственно-временные диаграммы в тестовых расчетах при различных значениях потока

Как видно из рисунков, структуры скорости на пространственно-временных диаграммах, полученных при моделировании, качественно согласуются с экспериментальными. Помимо этого, видно, что фронт уплотнения фиксирован в районе въезда, как ему и положено, исходя из наблюдений и теоретических выводов.

Заключение

Созданная математическая модель и программный комплекс CAM-2D применимы для моделирования транспортных потоков в дорожных сетях, для решения различных задач управления дорожным движением и могут быть использованы в качестве основы для разработки практического инструмента моделирования дорожного движения в городах. Полученные в расчётах результаты согласуются с экспериментальными данными.

Библиографический список

1. Nagel K., SchreckenbergM.. 1992. A cellular automaton model for freeway traffic. J.dePhysique, I. France 2(12): 2221.
 2. Maerivoet S., De MoorB. 2005. Cellular automata models of road traffics. PhysicsReports 419: 1–64.
 3. Barlovic R., SantenL., SchadschneiderA., SchreckenbergM. 1998. Metastable states in cellular automata for traffic flow. Eur. Phys. J. B 5: 793–800.
 4. Kerner B., KlenovS., SchreckenbergM. 2011. Simple cellular automaton model for traffic breakdown, highway capacity, and synchronized flow. Phys. Rev. E 046110: 84.
 5. Kerner B., KlenovS., HermannsG., SchreckenbergM. 2013. Effect of driver overacceleration on traffic breakdown in three-phase cellular automaton traffic flow models. Physica A.: Statistical Mechanics and its Applications 392: 4083–4105.
 6. Yang H., LuJ., HuX., JiangJ. 2013. A cellular automaton model based on empirical observations of a driver's oscillation behavior reproducing the findings from Kerner's threephase traffic theory. Physica A.: Statistical Mechanics and its Applications 392: 4009–4018.
 7. Chmura T., HerzB., KnorrF., PitzT., SchreckenbergM. 2014. A simple stochastic cellular automaton for synchronized traffic flow. Physica A.: Statistical Mechanics and its Applications 405: 332–337.
 8. Moussaa N., DaoudiaA. K. 2003. Numerical study of two classes of cellular automaton models for traffic flow on a two-lane roadway. Eur. Phys. J. B 31: 413–420.
 9. Appert-Rolland C., BoisberrangerJ. D. 2013. Macroscopic relaxation after on-ramps in real data and in cellular automata simulations. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 34: 162–175.
- 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 CAM-2D //

- Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2016. – №124 – 17 с. doi:10.20948/prepr-2016-124, <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-124>
- 10.Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г. Описание динамики транспортных потоков на элементах улично-дорожной сети с использованием двумерных математических моделей // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2016. – №93 – 20 с. doi:10.20948/prepr-2016-93 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-93>
- 11.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 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-136>
- 12.Герман М.С., Ермаков А.В. Архитектура и функциональные возможности системы визуализации потоков автотранспорта на элементах улично-дорожной сети // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2017. – № 145. – 21 с. doi:10.20948/prepr-2017-145 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-145>
- Герман М.С., Ермаков А.В. Новые функциональные возможности системы визуализации потоков автотранспорта на элементах улично-дорожной сети // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2021. – №80. – 16 с. doi:10.20948/prepr-2021-80, <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2021-80>
- 13.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. – Т. 19, № 9. – С. 110-120.
- 14.Kerner, B. 2004. The physics of Traffic. Springer, Berlin. 682 p.

Оглавление

Введение	3
Разработанная модель и ее численная реализация	3
Тестовые задачи.....	6
Заключение.....	11
Библиографический список.....	11