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

Препринты ИПМ • Препринт № 236 за 2018 г.

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

Чечина А.А.

Воспроизведение экспериментальных пространственно-временных структур в транспортных потоках при помощи математической модели на основе теории клеточных автоматов

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Чечина А.А. Воспроизведение экспериментальных пространственно-временных структур в транспортных потоках при помощи математической модели на основе теории клеточных автоматов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 236. 16 с. doi:10.20948/prepr-2018-236
URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-236

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

Воспроизведение экспериментальных пространственно-временных структур в транспортных потоках при помощи математической модели на основе теории клеточных автоматов.

Москва — 2018

А.А. Чечина

Воспроизведение экспериментальных пространственно-временных структур в транспортных потоках при помощи математической модели на основе теории клеточных автоматов

В препринте представлена новая модель на основе теории клеточных автоматов – модель с «медленным стартом». Приводится исследование пространственно-временных структур, полученных при помощи этой модели, а также созданной ранее модели на основе теории клеточных автоматов. Проводится анализ и сравнение полученных результатов между собой и с экспериментальными данными реальных транспортных потоков.

Ключевые слова: автотранспортные потоки, микроскопический подход, клеточные автоматы

A.A. Chechina

Reproduction of experimental space-time patterns in traffic flows using mathematical model based on cellular automata theory

New “slow-to-start” mathematical model of traffic flows based on cellular automata (CA) theory is presented in the preprint. The research of space-time structures obtained using this model, as well as previously created CA model, is adduced. The analysis and the comparison of the results obtained using both models are carried out. The comparison with real traffic experimental data is presented.

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

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 16-01-00347-а, 18-01-00405-а, 18-51-41001-Узб_т.

Введение

Теория клеточных автоматов (Cellular Automata, CA), предложенная и развитая Джоном фон Нейманом в середине XX века, нашла свое применение во множестве областей науки. С ее помощью моделируют экономические, социальные, технические, биологические и другие процессы.

С 1992 года, когда Кай Нагель и Михаэль Шрекенберг [1] предложили применить теорию клеточных автоматов к транспортному моделированию, учеными со всего мира было создано множество вариантов моделей транспортных потоков на ее основе. Ранее данный 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.

Благодаря развитию компьютерной техники появилась возможность учитывать в создаваемых моделях все больше нюансов поведения участников движения, а благодаря развитию самой теории транспортных потоков – новые представления о закономерностях, наблюдаемых в данных измерений. Также, в последнее время собирается и хранится большое количество данных с датчиков и камер наблюдения, а значит, и возрастают требования к создаваемым математическим моделям.

В мегаполисах по всему миру для управления дорожным движением в реальном времени внедряется так называемая Интеллектуальная Транспортная Система (ИТС). Моделирование различных ситуаций и мер, принимаемых в ответ на возникающие проблемы – аварии, заторы и т.п. – является необходимой частью управления. Поэтому создание новых моделей, позволяющих быстро, но точно делать такого рода прогнозы, является актуальной задачей на сегодняшний день.

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

Также в работе предложена новая модель из класса моделей «медленного старта», тоже основанная на теории клеточных автоматов. Обе модели исследуются на предмет воспроизведения экспериментальных пространственно-временных структур в транспортном потоке, проводится сравнение моделей между собой.

Клеточные автоматы в транспортном моделировании

При построении СА-модели транспортных потоков трасса 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. 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.

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 рисунке 1:

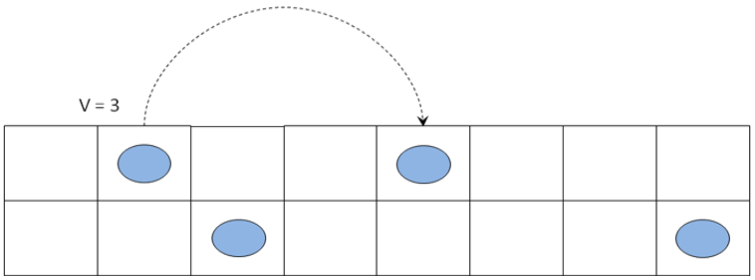

Рис. 1. Расчетная область в обобщенной двумерной микроскопической модели

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.

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.

Модель позволяет описывать различные стратегии водителей: они могут быть «осторожными», «агрессивными» и «вежливыми» [3].

Модели с «медленным стартом»

Модели с «медленным стартом» (“slow-to-start”) – класс моделей, где автомобили, начинающие движение, стартуют только при условии, что перед ними имеется более одной свободной ячейки [4].

На первый взгляд, это условие не следует очевидно и однозначно из наблюдения за поведением водителей. Оно было включено для того, чтобы автомобили не разъезжались слишком быстро от места затора, что позволяет, в свою очередь, воспроизвести эффект гистерезиса при переходе от свободного к синхронизированному потоку (при одной и той же величине потока движение может быть как свободным, так и стесненным, в зависимости от случайных процессов в транспортном потоке).

Согласно «теории трех фаз» Б. Кернера [5], в транспортном потоке выделяют три фазы: F – фаза свободного движения, S – фаза синхронизированного потока и J – фаза широкого движущегося кластера (стесненного движения). Благодаря нестабильности потока, например, из-за эффекта «переускорения» [6], фазовые переходы могут случаться спонтанно. Как показывает опыт, модели класса «медленный старт» более успешно воспроизводят такие фазовые переходы.

Для учета «медленного старта» в созданную модель были добавлены соответствующие условия, проверяющие, сколько свободных ячеек имеется впереди и позволяющие автомобилям начинать движение только тогда, когда их как минимум 2.

Моделирование на различных элементах УДС

Для созданных моделей были разработаны численные алгоритмы и программный комплекс, реализующий их. Он позволяет моделировать дорожное движение на различных элементах улично-дорожной сети – перекрестках, въездах/съездах, участках с расширением и т. п. Комплекс написан на языке C/C++ и использует библиотеку Glut для визуализации расчетов. На рисунке 2 показано, как выглядят расчеты для Т-образного и 4-х стороннего перекрестков со светофорным регулированием, въезда на шоссе,

прямого участка дороги с пешеходным светофором и участка дороги с расширением. Мелкие квадраты здесь – автомобили (цветом обозначена их цель), более крупные квадраты представляют светофоры.

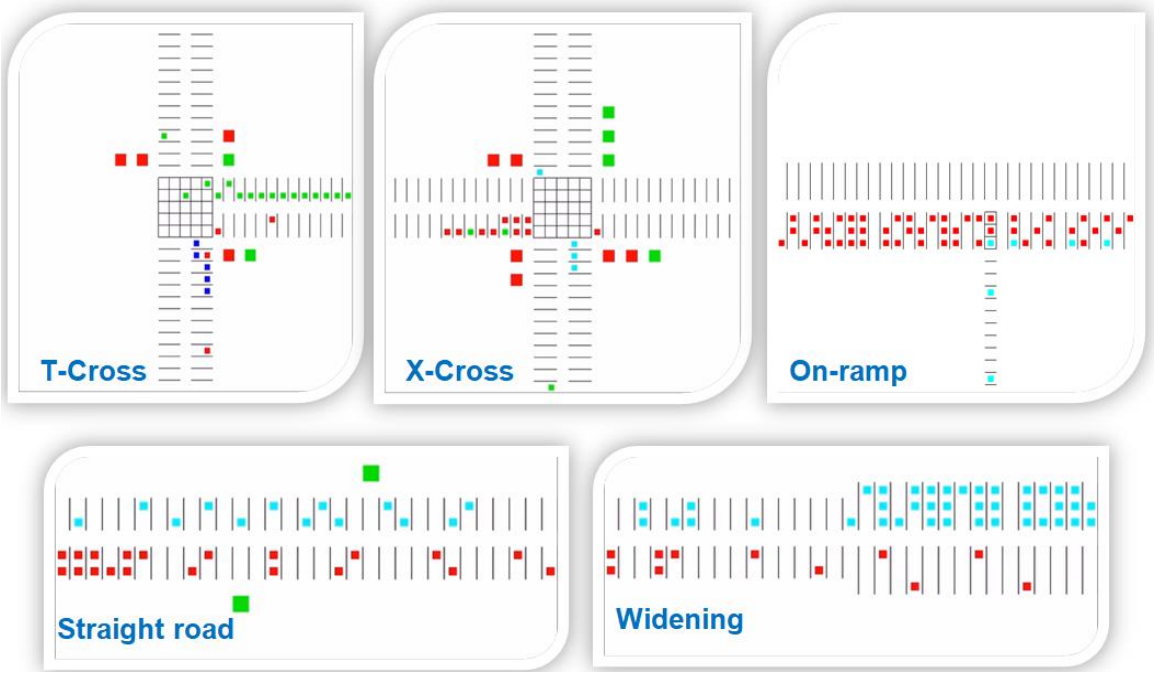

Рис. 2 Расчеты на основных элементах УДС

Из этих элементов можно собирать сети различной конфигурации и делать расчеты на более крупных участках УДС.

Пространственно-временные структуры в транспортных потоках и задача о въезде

На рисунке 3 (взят из работы [5]) представлены экспериментальные данные о транспортных потоках, собранные по всему миру. По оси X отложено время (ч), по Y – расстояние (км), цветом представлена скорость автомобилей. Белый цвет соответствует скорости свободного движения, желтый – скорости стесненного движения, красный – низкой или нулевой скорости. На всех картинках видны характерные структуры, представляющие из себя различные фазы. Широкие движущиеся кластеры (красные участки на рисунках), образовавшиеся внутри синхронизированного потока (желтые участки), распространяются со временем против движения.

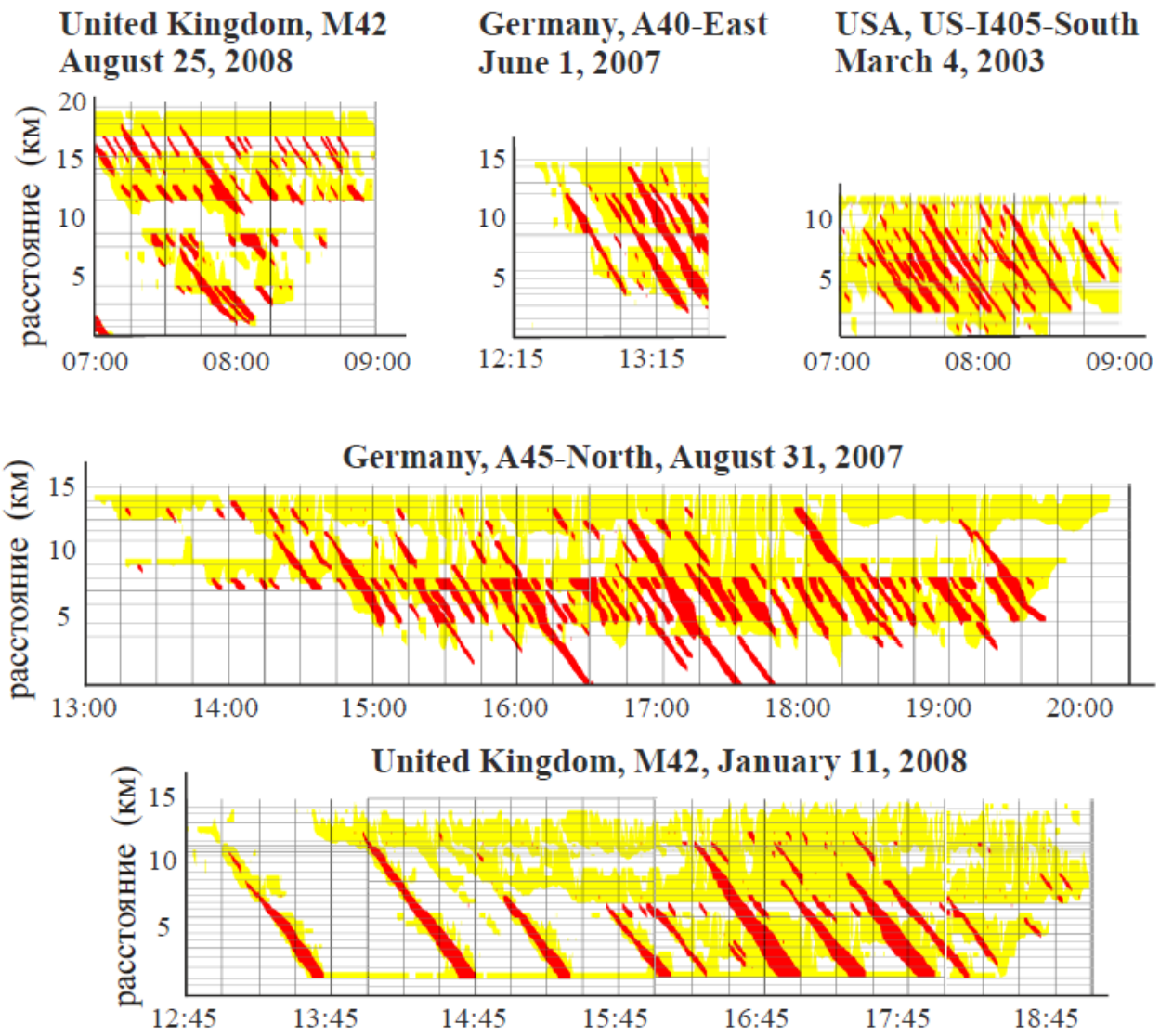

Рис. 3 Типичные пространственно-временные структуры транспортного потока в реальных данных, измеренных с помощью детекторов, установленных на дорогах в Англии, Германии и США

Для проверки созданных моделей был проведен ряд тестовых расчетов с целью воспроизвести подобную «полосатую» структуру.

В качестве тестовой задачи была выбрана задача о въезде на автомагистраль (рисунок 4). На главную дорогу с потоком автомобилей Q1 въезжают автомобили с второстепенной (поток Q2), соблюдая правила приоритета.

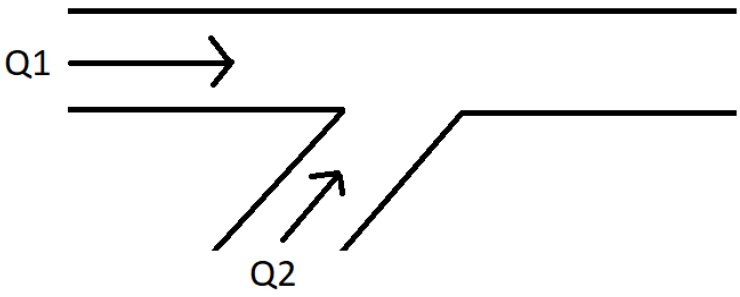

Рис. 4 Въезд на автомагистраль (on-ramp)

Расчеты проводились с различными значениями потоков Q1 и Q2. Результаты для модели без «медленного старта» представлены на рисунках 5, 6 и 7. По оси абсцисс указано время в минутах, по оси ординат – расстояние в километрах. Въезд находится посередине рассматриваемого участка, на отметке 3,5 км. Цветом показана скорость автомобилей, где синий – максимальная скорость (100 км/ч и более), а красный – пробка (10 км/ч и менее). Поток Q1 остается постоянным в течение каждого из расчетов, а поток Q2 начиная с середины расчетного времени падает до нуля.

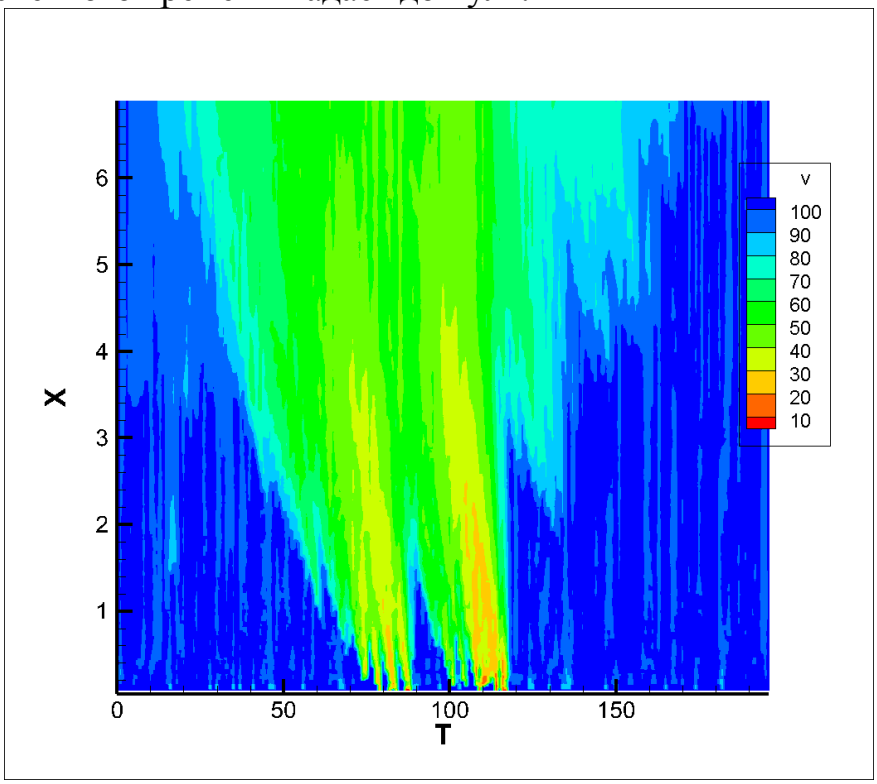

Рис. 5 Пространственно-временные структуры в задаче о въезде.
Q1=21 авт/мин, Q2=2 авт/мин при T<100мин и 0 авт/мин при T>100 мин.

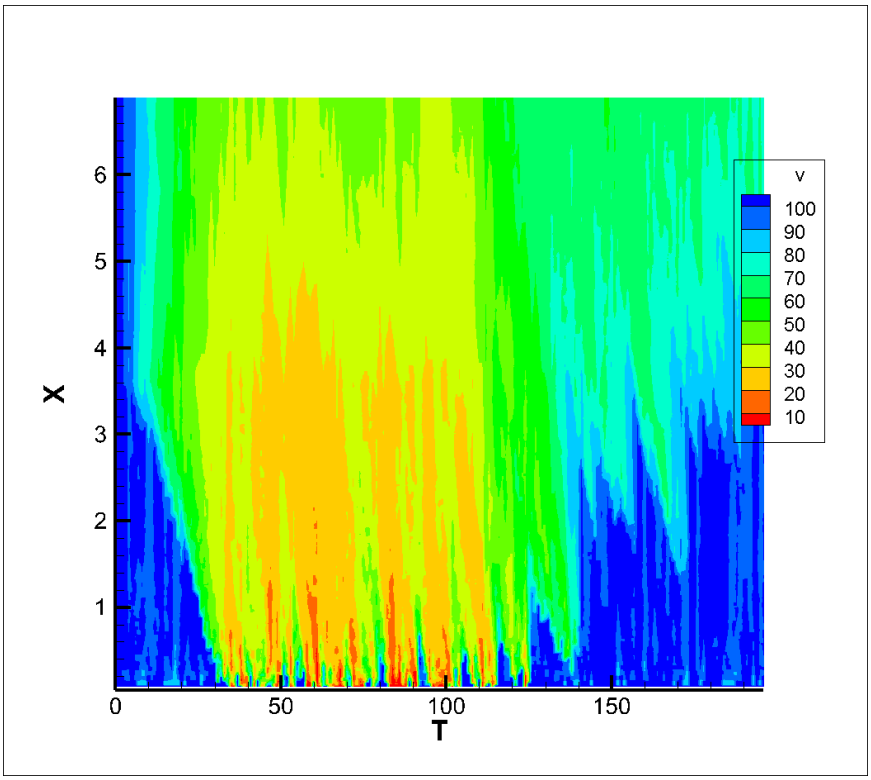

Рис. 6 Пространственно-временные структуры в задаче о въезде. Q1=22 авт/мин, Q2=6 авт/мин при T<100мин и 0 авт/мин при T>100 мин.

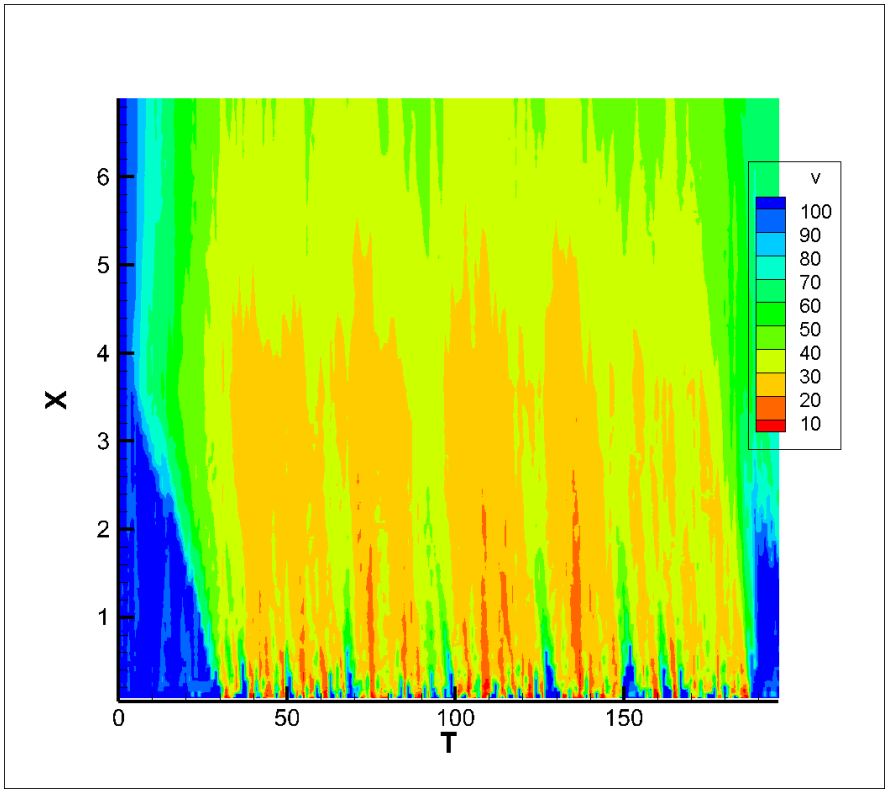

Рис. 7 Пространственно-временные структуры в задаче о въезде. Q1=25 авт/мин, Q2=9 авт/мин при T<100мин и 0 авт/мин при T>100 мин.

На рисунках видно, что сначала скорость потока уменьшается в области за въездом, затем поток становится синхронизированным и падение скорости происходит в обеих частях дороги – и за въездом, и перед ним. По мере дальнейшего падения скорости из-за увеличения плотности автомобилей возникают области затрудненного движения, которые распространяются против потока. Благодаря наличию возмущений в синхронизированном потоке может спонтанно произойти S-J переход. После «выключения» потока со второстепенной дороги (момент T=100 мин) автомобили постепенно разъезжаются от места затора, скорость потока повышается.

Аналогичная серия расчетов выполнена для модели с «медленным стартом», результаты представлены на рисунках 8, 9 и 10. Расчеты проводились для тех же значений Q1 и Q2, что и в предыдущем случае.

Как видно из рисунков, обе модели воспроизводят характерные особенности пространственно-временных структур, наблюдаемых в эксперименте. Уплотнение, возникнув в определенный момент времени, далее распространяется против движения потока. В области, где уже наблюдается синхронизированный поток (60-70 км/ч), возникает пробка (фаза J).

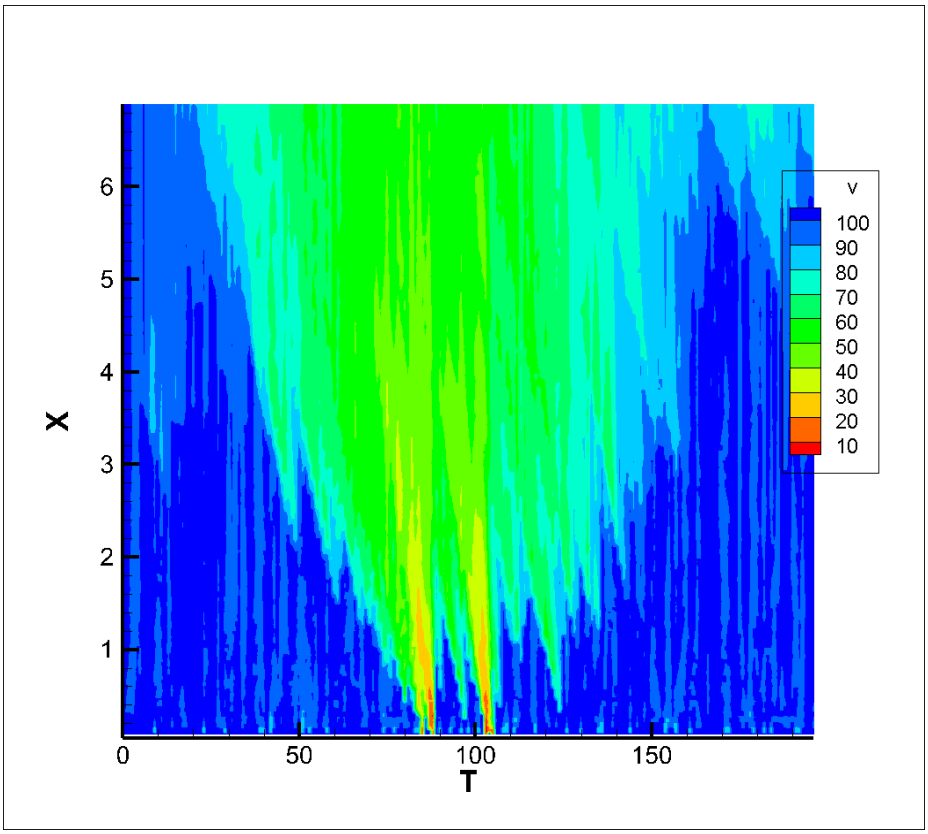

Рис. 8 Пространственно-временные структуры в задаче о въезде для модели с «медленным стартом». Q1=21 авт/мин, Q2=2 авт/мин при T<100мин и 0 авт/мин при T>100 мин.

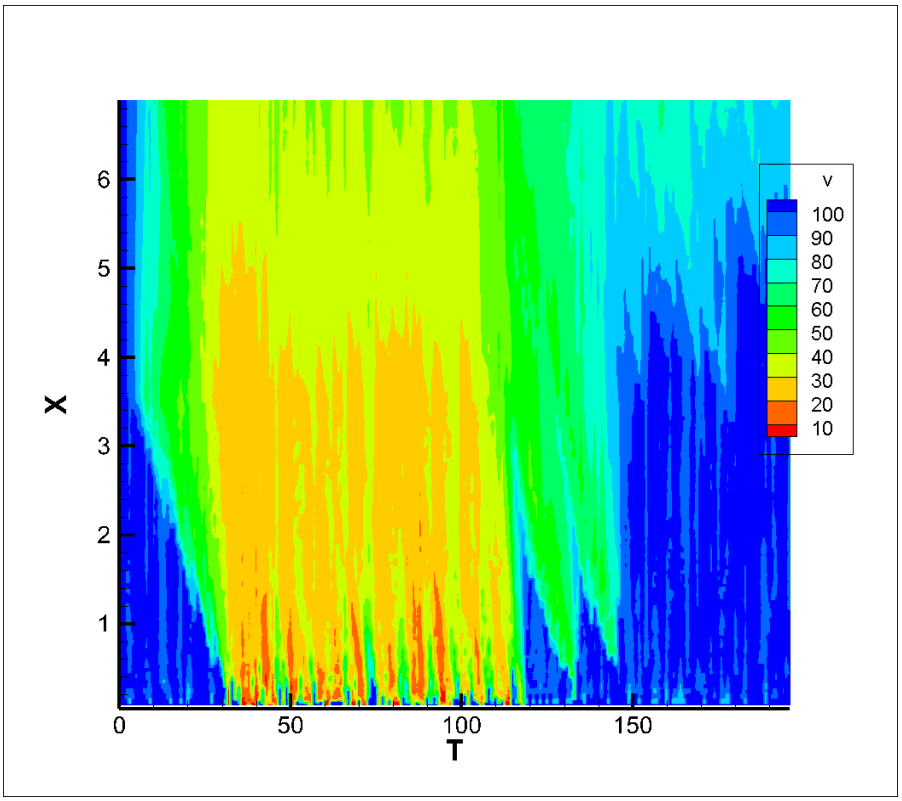

Рис. 9 Пространственно-временные структуры в задаче о въезде для модели с медленным стартом. Q1=22 авт/мин, Q2=6 авт/мин при T<100мин и 0 авт/мин при T>100 мин.

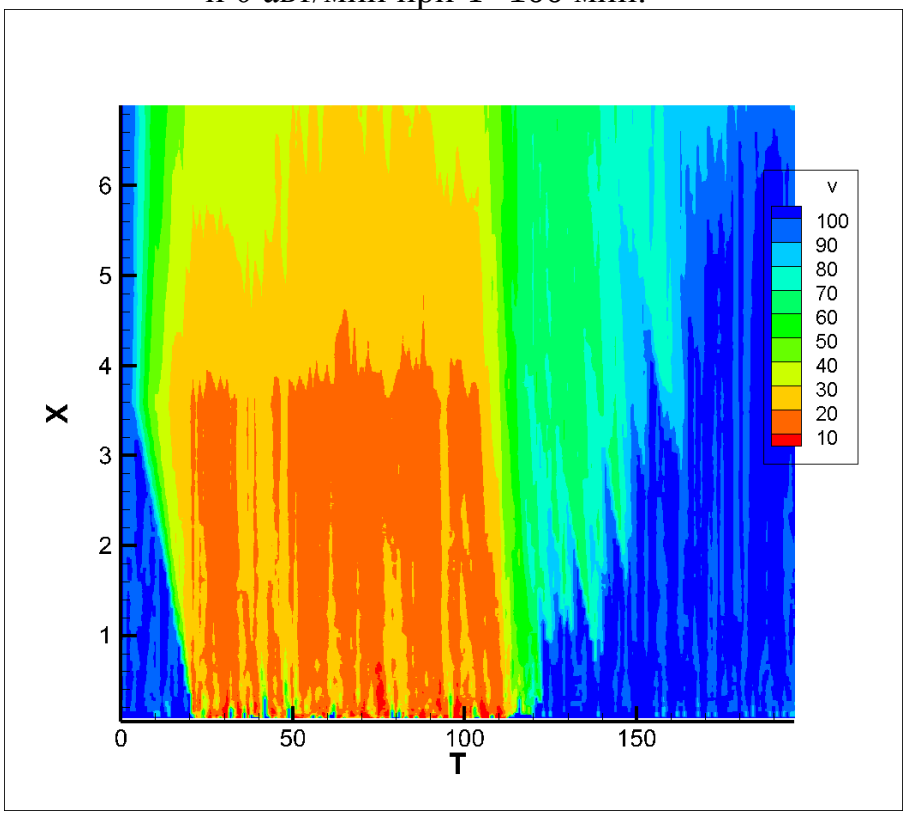

Рис. 10 Пространственно-временные структуры в задаче о въезде для модели с медленным стартом. Q1=25 авт/мин, Q2=9 авт/мин при T<100мин и 0 авт/мин при T>100 мин.

В модели с медленным стартом при тех же данных входящих потоков больше «красных» областей, где скорость близка к нулю. Особенно это заметно на рис. 7 и 10. Однако, возникающие структуры в целом похожи.

Различия между моделями более очевидны, если сделать расчет аналогичной задачи с большим значением Q2. На рисунках 11, 12 представлены результаты такого расчета для обеих моделей.

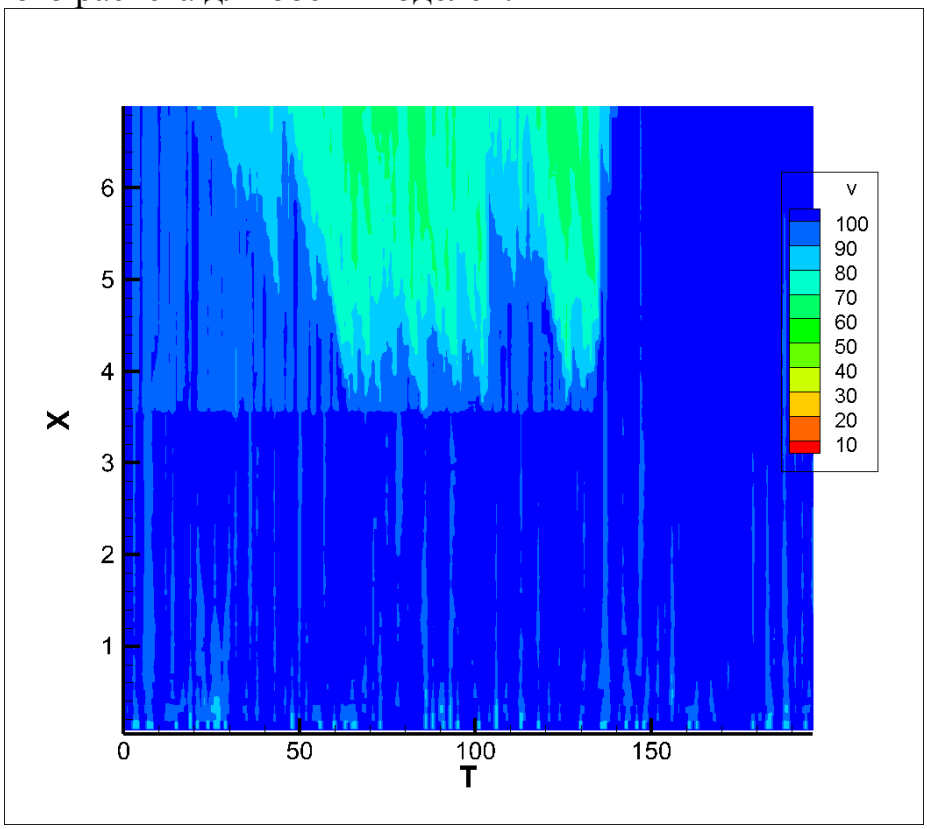

Рис. 11 Задача о въезде для модели без медленного старта. Q1=20 авт/мин, Q2=25 авт/мин при T<100мин и 0 авт/мин при T>100 мин.

На рисунке 11 можно в явном виде наблюдать уменьшение скорости в точке въезда (точка 3,5 км по оси ординат) и за ней. В потоке за въездом наблюдается F-S переход из-за возмущений, вызванных стохастическим характером модели.

На рисунке 12 картина совсем другая. В потоке очень быстро образуется пробка, и скорость падает почти до нуля. Затор распространяется на всю длину дороги и сохраняется некоторое время после прекращения въезда автомобилей с второстепенной дороги.

Таким образом, при данном распределении потоков в задаче с въездом наличие «медленного старта» вносит существенные различия в получаемый результат.

Дальнейшие расчеты показали, что картина, аналогичная рисунку 12, получается в модели без медленного старта при больших (по сравнению с текущими) значениях Q1 и Q2. Это означает, что, как и ожидалось, образование заторов в модели с «медленным стартом» происходит быстрее.

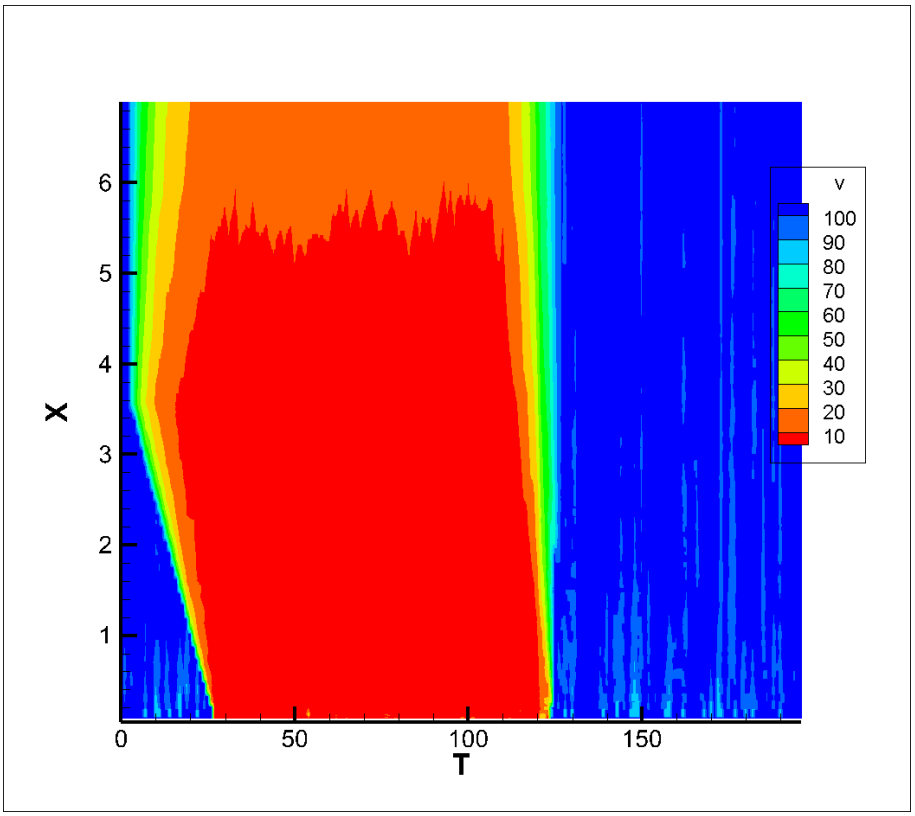

Рис. 12 Задача о въезде для модели с медленным стартом. Q1=20 авт/мин, Q2=25 авт/мин при T<100мин и 0 авт/мин при T>100 мин.

При моделировании реальных транспортных ситуаций на стадии калибровки модели следует выбирать вариант модели, обеспечивающий более близкий к экспериментальным данным результат.

В дальнейшем планируется продолжить исследование модели с «медленным стартом» на других тестовых задачах.

Спонтанный переход от свободного к плотному транспортному потоку (F-S переход) в созданных моделях

В качестве следующей задачи решено было проверить, как созданные модели воспроизводят спонтанный F-S переход.

На рисунке 13 (взят из [5]) представлена экспериментальная картина спонтанного фазового перехода от свободного потока к синхронизированному на автодороге в месте, где расположен въезд. Стрелкой указана точка на графике, в которой происходит спонтанный фазовый переход.

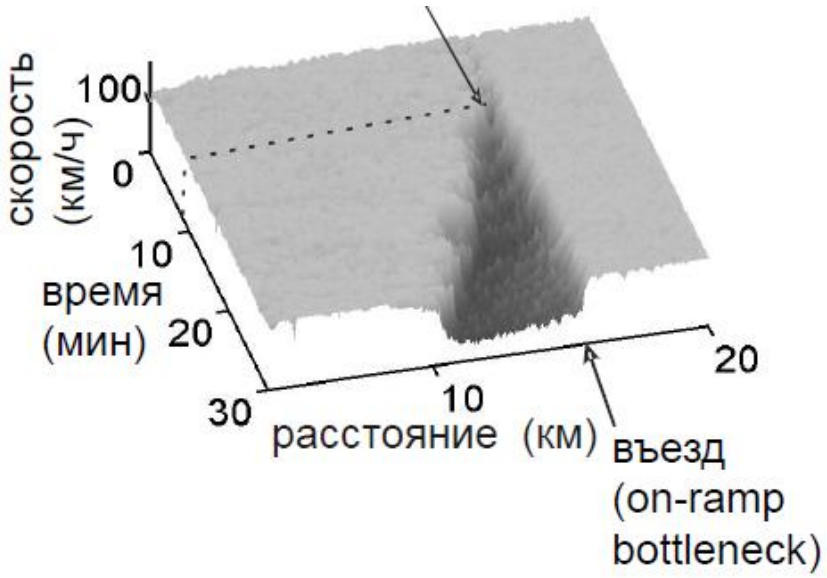

Рис. 13 Спонтанный F-S переход, наблюдаемый экспериментально

С помощью обеих моделей был проведен расчет для аналогичного участка дороги. Это та же задача о въезде, которая описана в предыдущем разделе, но, в данном случае, поток с второстепенной дороги Q2 не меняется на протяжении расчета. На рисунке 14 представлен результат, полученный при помощи модели без медленного старта, а на рисунке 15 – тот же результат для модели с медленным стартом.

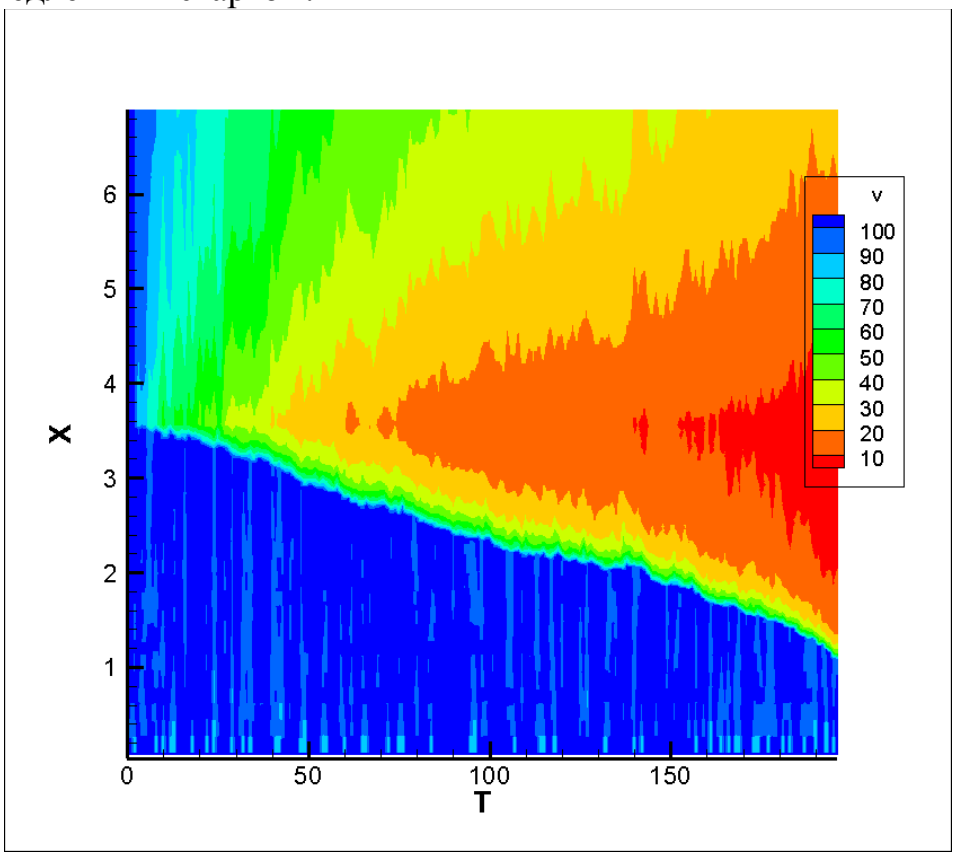

Рис. 14 Расчет без «медленного старта». Q1=10 авт/мин, Q2=20 авт/мин

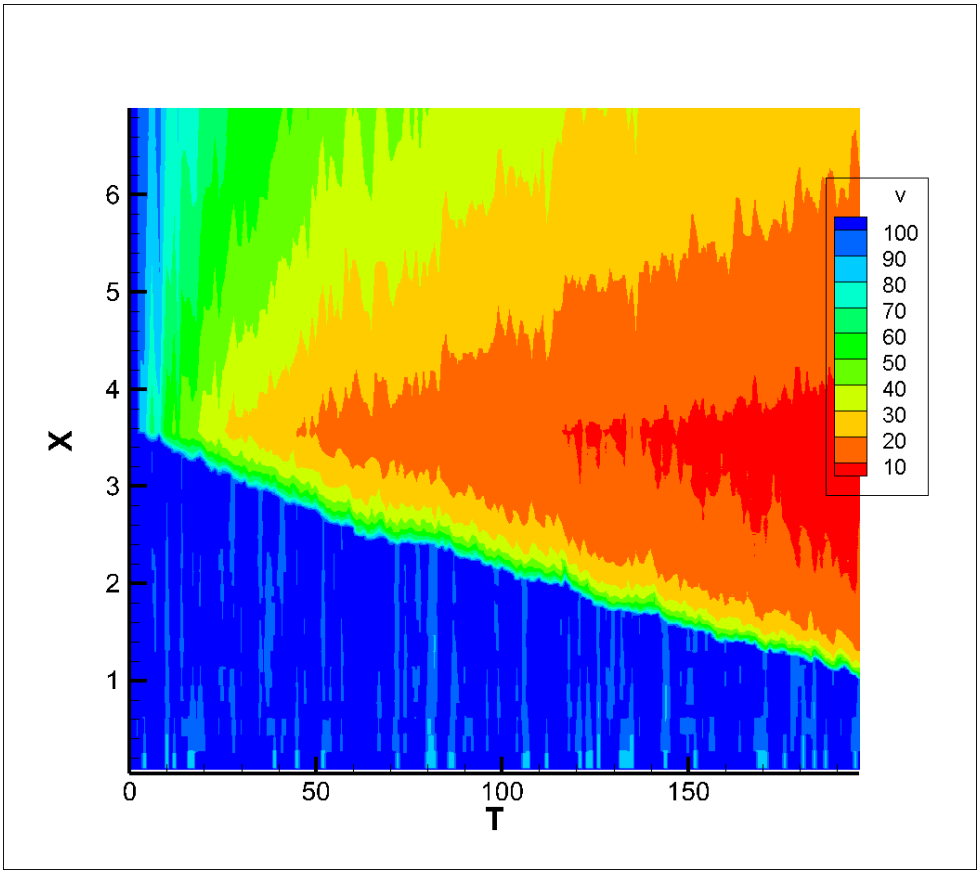

Рис. 15 Расчет «медленным стартом». Q1=10 авт/мин, Q2=20 авт/мин

Как видно из рисунков, обе модели адекватно воспроизводят F-S переход: небольшие колебания скорости в начальный момент времени постепенно становится все существеннее, происходит падение скорости и поток становится синхронизованным.

Как и в прошлом расчете, обе модели ведут себя примерно одинаково, с той лишь разницей, что при «медленном старте» на графике больше участков с более низкой скоростью по сравнению с моделью без «медленного старта».

Дальнейшие численные эксперименты могут выявить преимущества второго варианта модели, однако, пока не похоже, что «медленный старт» вносит какие-то существенные улучшения в основную CA-модель.

Заключение

Представленные в работе модели довольно хорошо воспроизводят пространственно-временные структуры в транспортных потоках, наблюдаемые экспериментально. Расчеты с помощью обеих моделей приводят к похожим результатам, с той лишь разницей, что «медленный старт» приводит к снижению скорости в целом.

В дальнейшем планируется провести ряд вычислительных экспериментов по моделированию формирования широких движущихся кластеров в плотном

транспортном потоке (S-J переход). Модели будут апробированы на других тестовых задачах для дальнейшего выяснения преимуществ и недостатков варианта с «медленным стартом».

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] Chechina A., Churbanova N., Trapeznikova M., Ermakov A., German M. Traffic flow modelling on road networks using cellular automata theory. // International Journal of Engineering & Technology (IJET), ISSN 2227-524X, Vol. 7, No 2.28, 2018, pp. 225-227

[3] 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

[4] Maerivoet S., Moor B. D. Cellular automata models of road traffic // Physics

Reports. 2005.‑November. Vol. 419, no. 1. Pp. 1‑64.

[5] Kerner B. The physics of Traffic // ‑ Berlin: Springer, 2004. 682 p.

[6] Kerner, B., S. Klenov, G. Hermanns, M. Schreckenberg. // Effect of driver overacceleration on traffic breakdown in three-phase cellular automaton traffic flow models. Physica A.: Statistical Mechanics and its Applications 2013. 392: 4083–4105

Оглавление

Введение 3

Клеточные автоматы в транспортном моделировании 4

Модели с «медленным стартом» 5

Моделирование на различных элементах УДС 5

Пространственно-временные структуры в транспортных потоках и задача о въезде 6

Спонтанный переход от свободного к плотному транспортному потоку (F-S переход) в созданных моделях 13

Заключение 15

Список литературы 16