

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "МОСКОВСКИЙ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ)"

На правах рукописи

Кленов Сергей Львович

СТОХАСТИЧЕСКИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНОГО
ПОТОКА В РАМКАХ ТЕОРИИ ТРЕХ ФАЗ

05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук

МОСКВА

2018

Оглавление

Введение	10
1. Теория трех фаз транспортных потоков Кернера	20
1.1. Два классических подхода к моделированию транспортных потоков	20
1.2. Об исследованиях в области теории и численного моделирования транспортных потоков в Российской Федерации	22
1.3. Эмпирические исследования свободного и плотного транспортного потока	26
1.4. Эмпирическая метастабильность перехода от свободного к плотному транспортному потоку и появление теории трех фаз Кернера	33
1.5. Основное предположение теории трех фаз Кернера	38
1.6. Основные гипотезы теории трех фаз Кернера	38
1.6.1. Гипотеза 1: Три фазы транспортного потока	39
1.6.2. Гипотеза 2: Метастабильная природа перехода от свободного к плотному транспортному потоку	43
1.6.3. Гипотеза 3: Z-характеристика перехода от свободного к плотному транспортному потоку	44
1.6.4. Гипотеза 4: Особенности поведения водителей, приводящие к переходу от свободного к плотному транспортному потоку	44
1.6.5. Гипотеза 5: Разрывный характер переускорения	44

1.6.6.	Гипотеза 6: Бесконечное количество значений пропускной способности автодороги в любой момент времени	45
1.6.7.	Гипотеза 7: Последовательность $F \rightarrow S \rightarrow J$ переходов	45
1.6.8.	Гипотеза 8: Двойная Z -характеристика для фазовых переходов в транспортном потоке	46
1.6.9.	Гипотеза 9: Две качественно различные неустойчивости в синхронизованном потоке	48
1.6.10.	Гипотеза 10: Вероятности $F \rightarrow S$ и $F \rightarrow J$ переходов	50
1.6.11.	Гипотеза 11: 2D-состояния синхронизованного потока	50
1.6.12.	Гипотеза 12: Линия J и $S \rightarrow J$ переход	52
1.7.	Основная цель диссертации	54
2.	Подход клеточных автоматов (КА) к теории трех фаз	55
2.1.	Мотивация для КА моделей в теории трех фаз	55
2.2.	Правила движения для трехфазной КА модели	56
2.2.1.	Детерминированные правила движения (без стохастической составляющей)	56
2.2.2.	Расстояние синхронизации	59
2.2.3.	Стационарные состояния	60
2.2.4.	Стохастическое ускорение и торможение	62
2.3.	Трехфазная КА модель транспортного потока с ситуативным временем задержки водителя при ускорении	65
2.3.1.	Правила движения	65
2.3.2.	Граничные и начальные условия	71
2.3.3.	Характеристики поведения водителя, используемые в трехфазной КА модели	72
2.3.3.1.	Эффект адаптации скорости	72
2.3.3.2.	Эффект переускорения	73
2.3.3.3.	Математическое моделирование эффекта переускорения из-за смены полосы	75
2.3.4.	Правила движения автомашин на узком месте автодороги в КА модели	77

2.3.4.1.	Модели узкого места из-за въезда/съезда и из-за слияния полос	77
2.3.4.2.	Модель движущегося узкого места	79
2.3.5.	Правила движения автомашин в области въезда, съезда и слияния полос	80
2.4.	Разработка вероятностной модели перехода от свободного к плотному транспортному потоку	85
2.4.1.	Теоретическая вероятность спонтанного перехода от свободного к плотному транспортному потоку	85
2.4.2.	Зависящие от потока характеристики спонтанного перехода от свободного к плотному транспортному потоку	86
2.4.2.1.	Диапазон потоков I	88
2.4.2.2.	Диапазон потоков II	89
2.4.2.3.	Диапазон потоков III	90
2.4.2.4.	Диапазон потоков IV	91
2.4.3.	Временная задержка перехода от свободного к плотному транспортному потоку на узком месте и расчет вероятности перехода	91
2.5.	Возникновение движущихся кластеров в синхронизованном потоке	98
2.6.	Сравнение КА модели в рамках теории трех фаз с Nagel-Schreckenberg КА моделью	98

3. Стохастическая микроскопическая модель в рамках теории трех фаз 104

3.1.	Мотивация	104
3.2.	Основные правила движения для модели одинаковых водителей и одинаковых автомашин	105
3.2.1.	Расстояние синхронизации и гипотетические стационарные состояния синхронизованного потока	106
3.2.2.	Флуктуации скорости автомашины	108

3.2.3.	Случайная временная задержка ускорения и торможения	109
3.2.4.	Безопасная скорость	109
3.2.5.	Граничные и начальные условия	111
3.3.	Правила смены полосы на автодороге с двумя полосами . .	112
3.4.	Правила движения автомашин в моделях узкого места на автодороге	113
3.4.1.	Модели узкого места из-за въезда/съезда и из-за слияния полос	113
3.4.2.	Модель движущегося узкого места	114
3.4.3.	Правила движения автомашин в области въезда, съезда и слияния полос	115
3.4.3.1.	Адаптация скорости в области узкого места, где автомашина меняет полосу	115
3.4.3.2.	Условие безопасности при смене полосы в моделях узкого места	116
3.4.3.3.	Скорость и координата автомашины после смены полосы в моделях узкого места . . .	117
3.5.	Основные отличия стохастической микроскопической модели от классических микроскопических моделей	118
4.	Разработка алгоритмов и комплекса программ для моделирования пространственно-временных структур транспортного потока	119
4.1.	Макроскопическая Z-характеристика для перехода от свободного к плотному транспортному потоку ($F \rightarrow S$ переход) . .	119
4.1.1.	Временная задержка перехода от свободного к плотному транспортному потоку ($F \rightarrow S$ переход) на узком месте автодороги	122
4.1.2.	Индукцированный переход от свободного к плотному транспортному потоку	124
4.2.	Двойная Z-характеристика для фазовых переходов	125
4.2.1.	$S \rightarrow J$ переход	125

4.2.2.	Численное моделирование последовательности $F \rightarrow S \rightarrow J$ переходов	126
4.3.	Пространственно-временные структуры плотного потока на изолированном узком месте автодороги	130
4.3.1.	Диаграмма пространственно-временных структур плотного потока на узком месте из-за въезда на автодорогу. Структуры синхронизованного потока	130
4.3.1.1.	Расширяющаяся структура синхронизованного потока (Widening synchronized flow pattern, WSP)	130
4.3.1.2.	Локализованная структура синхронизованного потока (Localized synchronized flow pattern, LSP)	130
4.3.1.3.	Движущаяся структура синхронизованного потока (Moving synchronized flow pattern, MSP)	132
4.3.2.	Общая пространственно-временная структура плотного потока (General Pattern, GP)	132
4.3.3.	Эволюция пространственно-временных структур плотного потока, возникающих на узком месте из-за въезда на автодорогу	137
4.4.	Гистерезис и эффекты метастабильности для пространственно-временных структур плотного потока, возникающих на узком месте из-за въезда на автодорогу	140
4.4.1.	Порог возникновения структур синхронизованного потока	140
4.4.2.	Порог возникновения общей структуры плотного потока	143
4.4.3.	Пересечение областей метастабильности и множественное возбуждение структур плотного потока	145
4.5.	Индукцированное образование структур плотного транспортного потока и “эффект захвата”	146

5. Разработка алгоритмов и комплекса программ для моделирования интеллектуальных транспортных технологий	150
5.1. Вычислительный эксперимент по моделированию коммуникации между машинами (V2V communication) с целью предотвращения образования пробок	150
5.1.1. О транспортных приложениях ad-hoc сетей коммуницирующих автомашин	150
5.1.2. Комплекс программ для численного моделирования транспортных потоков с коммуницирующими автомашинами в рамках теории трех фаз и анализа влияния коммуникации между автомашинами на свойства транспортного потока	154
5.1.3. Алгоритм для одновременного моделирования ad-hoc сети между коммуницирующими автомашинами и движения автомашин в транспортном потоке	155
5.1.3.1. Режим доступа для передачи сообщений	155
5.1.3.2. Модель распространения радиоволн	156
5.1.3.3. Матрица мощности сигналов	158
5.1.3.4. Характеристики приема сообщения	160
5.1.3.5. Очередь сообщений и их приоритет	160
5.1.3.6. Сценарии приложений	160
5.1.4. Влияние сообщения об опасности “впереди стоит сломавшаяся автомашина” на возникновение структур плотного потока	161
5.1.5. Предотвращение перехода к плотному потоку на узком месте автодороги с помощью ad-hoc сети коммуницирующих автомашин	164
5.1.6. Влияние ad-hoc сети коммуницирующих автомашин на пространственно-временные структуры плотного потока	165
5.2. Вычислительный эксперимент по моделированию плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами	169

5.2.1.	Микроскопическая теория возмущений в свободном транспортном потоке, вызывающих переход к плотному транспортному потоку вблизи узких мест на автомагистрали	169
5.2.2.	Двухмерная асимметричная структура волны в свободном потоке и возникновение возмущения, приводящего к спонтанному переходу от свободного к плотному транспортному потоку на узком месте автодороги	170
5.2.3.	Вероятностные свойства перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узких мест на автомагистрали	173
5.2.4.	Анализ модельных траекторий автомашин в транспортном потоке с движущимся узким местом из-за медленной автомашины на двухполосной автодороге с узким местом из-за въезда	180
5.2.4.1.	Влияние эффекта смены полосы на увеличение потока в окрестности движущегося узкого места	180
5.2.4.2.	Микроскопическая структура постоянного локального возмущения скорости на узком месте из-за въезда на автодорогу	181
5.2.4.3.	Микроскопические особенности взаимодействия между волной в свободном потоке позади медленной автомашины и постоянным локальным возмущением скорости на узком месте из-за въезда на автодорогу	182
5.3.	Вычислительный эксперимент по моделированию сложного гетерогенного транспортного потока	185
5.3.1.	Правила движения автомашин на одной полосе в гетерогенном транспортном потоке	187
5.3.1.1.	Стационарные состояния и правила движения	187
5.3.1.2.	Флуктуации	188
5.3.1.3.	Безопасная скорость	190

5.3.2.	Правила смены полосы в модели гетерогенного транспортного потока на двухполосной автодороге	190
5.3.3.	Граничные и начальные условия и модели узких мест на автодороге	193
5.3.4.	Реалистичный гетерогенный транспортный поток на трехполосной автомагистрали	194
5.3.4.1.	Зависимость скорости автомашин в свободном потоке от расстояния между автомашинами	194
5.3.4.2.	Численное моделирование пространственно-временных структур плотного потока на реальной трехполосной автомагистрали	196
5.3.4.3.	Сравнение результатов численного моделирования с реальными данными	201
5.4.	Вычислительный эксперимент по оценке качества и точности предупреждения водителей о пробках	207
5.4.1.	Реконструкция фронтов между тремя различными фазами транспортного потока с помощью пробных машин	208
5.4.2.	Численное моделирование пространственно-временной динамики для различного уровня проникновения данных пробных автомашин в транспортном потоке	210
5.4.3.	Генерация сообщений “предупреждение о пробке”	211
5.4.3.1.	Генерация сообщений “предупреждение о пробке” на основе эмпирических данных от пробных автомашин	211
5.4.3.2.	Зависимость сообщений с предупреждением о пробке от уровня проникновения данных пробных автомашин	214
5.4.3.3.	Фазы транспортного потока на разных полосах автодороги, идентифицированные с помощью данных пробных автомашин	216

5.5.	Вычислительный эксперимент по моделированию перенасыщенного режима транспортного потока на светофоре	219
5.5.1.	Модель городского транспортного потока	219
5.5.1.1.	Адаптация параметров модели городского транспортного потока	219
5.5.2.	Правила движения автомашин в модели городского транспортного потока	220
5.5.3.	Синхронизованный поток в перенасыщенном режиме транспортного потока на светофоре	221
5.6.	Применения разработанных в диссертации алгоритмов и комплекса программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий на фирме Daimler в Германии	229
	Заключение	231
	Список литературы	233

Введение

Актуальность работы

Появление заторов в транспортных потоках на автодорогах является повседневным фактором жизни для многих автомобилистов в любой промышленно развитой стране. По этой причине, одна из целей исследований в области транспорта и транспортных потоков заключается в том, чтобы обеспечить понимание природы появления дорожных заторов, что может быть использовано для эффективного регулирования и управления транспортными потоками, организации движения, оптимального распределения трафика по сети и для других интеллектуальных транспортных систем (ИТС), которые должны повысить безопасности движения и обеспечить качественную мобильность. (см., например, [1, 2, 7–9, 11, 12, 19–25, 34, 36, 39, 40, 71, 72, 81, 86, 87, 90, 91, 110, 124–128, 187, 188, 203, 204, 212, 215, 216, 222–224, 227–229, 231, 241–243, 250–257, 266, 278–284, 286, 288–291, 294, 307, 308, 316–318, 331, 333] а также ссылки в обзорах и трудах конференций [17, 32, 33, 35, 41–43, 47, 48, 53, 70, 76, 89, 93, 123, 138, 139, 197, 198, 208, 213, 214, 221, 225, 230, 233, 247, 310, 325, 327, 328]).

Чтобы показать, что интеллектуальные транспортные системы могут эффективно использоваться для решения транспортных проблем, надежность таких систем должна быть прежде всего доказана в численных экспериментах. Это связано с тем, что разработка реальных интеллектуальных транспортных технологий сопряжена с большими материальными затратами, и поэтому предварительный анализ их эффективного использования в численных экспериментах является необходимым. Следовательно, должны быть разработаны надежные модели для моделирования транспортных потоков. Такие модели должны быть способны воспроизводить результа-

ты эмпирических наблюдений пространственно-временных свойств транспортного потока, в частности, переход к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автодороге (“бутылочного горлышка”) и дальнейшее развитие дорожного затора.

Эмпирические наблюдения показывают, что транспортные заторы обнаруживают экстремально сложные пространственно-временные свойства. Такими пространственно-временными свойствами заторов в транспортном потоке являются следующие [123]:

- 1) Большое разнообразие пространственно-временных структур плотного транспортного потока, измеренных около узкого места на автодороге.
- 2) Сложная эволюция этих структур плотного транспортного потока во времени и пространстве, которая происходит, когда изменяются величина потоков и/или характеристики узкого места.
- 3) Сложные пространственно-временные явления, связанные со структурами плотного транспортного потока, возникающего вблизи двух или более примыкающих друг к другу узких мест.
- 4) Трансформация между различными структурами плотного транспортного потока, которая происходит из-за фазовых переходов между различными фазами транспортного потока.
- 5) Различные микроскопические характеристики плотного транспортного потока, связанные со сложным поведением водителей внутри плотного транспортного потока.
- 6) Сложная нерегулярная динамика движущихся широких кластеров в плотном транспортном потоке, которая возникает вблизи сильно перегруженного узкого места на автодороге.

В эмпирических исследованиях транспортных потоков дорожный затор обычно возникает в результате перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автодороге.

Пользователи транспортных сетей ожидают, что с помощью применения методов управления транспортными потоками, оптимального распределения трафика по сети, кооперативного движения и других интеллектуальных транспортных технологий переход к плотному транспортному потоку может быть предотвращен. В самом деле, транспортные заторы, возникающие в результате перехода к плотному транспортному потоку, вызывают значительное увеличение времени в пути, эмиссии CO₂ и других транспортных расходов. По этой причине, любая теория транспортных потоков, применяемая при разработке автоматических машин, надежных методов динамического распределения и управления транспортными потоками, должна быть совместима с эмпирическими свойствами перехода к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автодороге.

Наиболее важным эмпирическим свойством перехода к плотному транспортному потоку является метастабильность такого перехода, обнаруженная в реальных эмпирических данных. Термин *метастабильность* перехода к плотному транспортному потоку означает, что такой переход происходит в метастабильном состоянии свободного транспортного потока. В свободном потоке существует много возмущений скорости (плотности, величины потока). Такие возмущения могут иметь различную амплитуду. Когда случайным образом возникает возмущение, амплитуда которого превышает критическую амплитуду, происходит переход к плотному транспортному потоку. Такое возмущение, приводящее к переходу к плотному транспортному потоку, называется “зародышем”. Напротив, если амплитуда возмущения меньше, чем критическая, возмущение затухает, и переход к плотному транспортному потоку не происходит. Согласно [138], метастабильная природа перехода к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автодороге может рассматриваться как эмпирическое основание науки о транспортных потоках. Чтобы объяснить метастабильную природу перехода к плотному транспортному потоку, Кернер ввел теорию трех фаз [113, 114, 114, 115, 115] (см. другие ссылки в книгах [123, 131, 138]).

Однако теория трех фаз Кернера является качественной теорией, которая состоит из системы гипотез. В диссертации разработаны математические стохастические модели транспортного потока в рамках теории

трех фаз Кернера. Показано, что эти модели могут воспроизвести все известные к настоящему времени эмпирические пространственно-временные характеристики перехода к плотному потоку и возникающего транспортного затора. Эти модели применяются для численных экспериментов по моделированию различных интеллектуальных транспортных систем.

Цели и задачи диссертационной работы:

1. Разработка стохастических математических моделей транспортных потоков в рамках теории трех фаз.

2. Разработка вероятностной модели перехода от свободного к плотному транспортному потоку.

3. Разработка алгоритмов и комплекса программ для моделирования пространственно-временных структур транспортного потока.

4. Разработка алгоритмов и комплекса программ для моделирования интеллектуальных транспортных технологий.

5. Проведение вычислительных экспериментов по моделированию пространственно-временных структур транспортного потока и интеллектуальных транспортных технологий на основе разработанного комплекса программ.

Научная новизна работы

Впервые разработаны стохастические математические модели транспортных потоков, описывающие эмпирический фазовый переход от свободного к плотному транспортному потоку.

Впервые на основе разработанных моделей найдены свойства сложных пространственно-временных структур в плотном транспортном потоке и диаграмма этих структур, которые описывают всю известную совокупность пространственно-временных структур, наблюдаемых в реальных данных измерений транспортного потока.

В рамках теории трех фаз впервые разработан алгоритм для моделиро-

вания стохастического поведения водителей в различных ситуациях, возникающих в транспортном потоке. Алгоритм позволяет моделировать случайные ускорение и замедление машины со случайными задержками во времени.

В рамках теории трех фаз впервые проведены вычислительные эксперименты, которые позволили определить свойства и качество следующих интеллектуальных транспортных технологий: (i) коммуникации между машинами с целью предотвращения образования пробок, (ii) плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами, (iii) сложного гетерогенного транспортного потока, (iv) предупреждения водителей о пробках, (v) перехода к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре.

Основные результаты, выносимые на защиту

- 1) Впервые разработаны стохастические математические модели транспортных потоков, описывающие эмпирический фазовый переход от свободного к плотному транспортному потоку.
- 2) На основе разработанных моделей найдены свойства и диаграмма сложных пространственно-временных структур в транспортном потоке, которые описывают всю совокупность этих структур, наблюдаемых в измерениях транспортного потока.
- 3) Разработан алгоритм для моделирования стохастического поведения водителей в различных ситуациях, возникающих в транспортном потоке. Алгоритм позволяет моделировать случайные ускорение и замедление машины со случайными задержками во времени.
- 4) Разработаны алгоритмы и комплекс программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий.
- 5) На основе разработанного комплекса программ проведены вычислительные эксперименты, которые позволили определить свойства и качество следующих интеллектуальных транспортных технологий:

- (i) коммуникации между машинами с целью предотвращения образования пробок,
- (ii) плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами,
- (iii) сложного гетерогенного транспортного потока,
- (iv) предупреждения водителей о пробках,
- (v) перехода к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре.

Практическая ценность

1. На основе результатов диссертации и разработанного комплекса программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий проведены вычислительные эксперименты, которые позволили определить свойства и качество следующих интеллектуальных транспортных технологий: (i) коммуникации между машинами с целью предотвращения образования пробок, (ii) плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами, (iii) сложного гетерогенного транспортного потока, (iv) предупреждения водителей о пробках, (v) перехода к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре.

2. Результаты диссертации и, в частности, комплекс программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий были использованы в компании Даймлер для проведения численных экспериментов по следующим интеллектуальным транспортным технологиям (см. Daimler-Certificate в § 5.6):

- для управления потоком машин, въезжающих на скоростную автодорогу (on-ramp metering),
- для управления скоростным режимом (speed limit control),
- для распределения трафика по транспортной сети (traffic assignment),

- для потребления топлива в транспортных сетях,
- для оценки системы адаптивного круиз-контроля (АСС).

3. Результаты диссертации и разработанные в ней стохастические трех-фазные модели транспортного потока были использованы многими другими авторами (см., например [57, 58, 60, 108, 298]).

Публикации автора по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 48 работ [63, 78, 111, 112, 142–150, 152–159, 161–177, 185, 186, 189, 226, 267–271, 329], из них 38 работ [78, 112, 142, 145, 147–150, 152–158, 161, 163, 165–177, 185, 186, 189, 226, 268–271] в научных изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования научных результатов докторских диссертаций, в том числе входящих в реферативные базы Scopus и Springer, включая 28 статей [112, 142, 147–149, 152–154, 156–158, 163, 165, 167–175, 177, 185, 186, 189, 226, 270] в российских и международных научных журналах.

Структура диссертации

В Главе 1 коротко рассмотрено современное состояние исследований в области транспортных потоков. Сначала обсуждаются результаты эмпирических исследований свободного и плотного потоков. Затем проводится краткий обзор моделей транспортного потока, а также объясняется эмпирическая метастабильная природа перехода к плотному транспортному потоку, что привело к появлению теории трех фаз Кернера. В конце Главы 1 объясняются основные гипотезы теории трех фаз Кернера.

Новые результаты диссертации представлены в главах 2–5.

В Главе 2 разработан подход клеточных автоматов (КА) к теории трех фаз. В частности, представлены модель поведения водителей и правила движения для модели КА. Проведено сравнение классических моделей клеточных автоматов для транспортного потока с разработанной в диссертации моделью клеточных автоматов в рамках теории трех фаз.

На основе этой трехфазной модели КА, разработана вероятностная модель перехода от свободного к плотному транспортному потоку (F→S переход). В частности, смоделированы спонтанный и индуцированный переходы, вероятность перехода к плотному потоку вблизи въезда на автодорогу. Изучено также возникновение движущихся широких кластеров в модели КА в рамках теории трех фаз.

В Главе 3 разработана стохастическая микроскопическая модель транспортного потока в рамках теории трех фаз. Было показано, что в разработанной стохастической микроскопической модели в рамках теории трех фаз, благодаря математическому описанию стохастического переускорения с случайной задержкой и эффекта адаптации скорости внутри состояний синхронизованного потока, переход от свободного к плотному потоку – это переход от метастабильного свободного потока к синхронизованному потоку (F→S переход), как наблюдается во всех эмпирических данных. Для математического моделирования интеллектуальных транспортных технологий, включая моделирование влияния автоматических машин на транспортных поток, в разработанной стохастической микроскопической модели введено так называемое состояние движения машины S_n , которое позволяет описывать случайное ускорение и замедление машины, а также времена случайной задержки водителя при ускорении и замедлении, независимо друг от друга в разных состояниях транспортного потока.

В Главе 4 были разработаны алгоритмы и комплекс программ для моделирования пространственно-временных структур транспортного потока. С этой целью, был разработан алгоритм, в котором применены специальные правила (в отличие от правил смены полосы) для въезда машин на основную дорогу, позволяющие обеспечить минимальные флуктуации скорости при больших потоках въезжающих машин. Была получена макроскопическая Z-характеристика для фазового перехода от свободного к плотному потоку (F →S переход). Кроме того, была найдена двойная Z-характеристика для фазовых переходов, которая описывает все многообразие и сложность фазовых переходов в транспортном потоке

Были также найдены основные типы пространственно-временных структур плотного транспортного потока, смоделировано индуцированное

образование структур в плотном транспортном потоке, и проанализирована эволюция пространственно-временных структур плотного транспортного потока, возникающих вблизи узких мест на автодороге. Наконец, была получена диаграмма пространственно-временных структур плотного транспортного потока.

В Главе 5 разработаны алгоритмы и комплекс программ для моделирования интеллектуальных транспортных технологий, а также проведены вычислительные эксперименты по моделированию пространственно-временных структур транспортного потока и интеллектуальных транспортных технологий на основе разработанного комплекса программ. Результаты вычислительных экспериментов позволили определить свойства и качество следующих интеллектуальных транспортных технологий:

- (i) коммуникации между машинами с целью предотвращения образования пробок (§ 5.1). Разработан алгоритм, в котором одновременно моделируются ad-hoc сеть, связанная с коммуникацией между машинами, и движение машин в транспортном потоке.
- (ii) плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами (§ 5.2). Разработан алгоритм для моделирования взаимодействия между машинами при смене полосы и обгоне медленно движущейся машины в транспортном потоке. Алгоритм обеспечивает реалистичную динамику смены полосы, в частности, отсутствие резких торможений.
- (iii) сложного гетерогенного транспортного потока (§ 5.3). Разработан алгоритм для моделирования взаимодействия между машинами при смене полосы при выезде и въезде машин на скоростную автодорогу. Алгоритм обеспечивает плавную динамику транспортного потока вблизи въездов и выездов, в частности, отсутствие нереалистично резких торможений.
- (iv) предупреждения водителей о пробках (§ 5.4). Разработан алгоритм для моделирования генерации предупреждения водителей о пробках,

в котором используется разделение переднего фронта синхронизованного потока от переднего фронта движущегося кластера.

- (v) перехода к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре (§ 5.5). Разработан алгоритм для моделирования прохождения машинами светофора, который делает прогноз возможности проехать светофор до начала красной фазы и одновременно обеспечивает плавную динамику подъезда к светофору в течении красной фазы

В § 5.6 перечислены направления применения на фирме Daimler в Германии разработанных в диссертации алгоритмов и комплекса программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации, выносимые на защиту.

Глава 1.

Теория трех фаз транспортных потоков Кернера

1.1. Два классических подхода к моделированию транспортных потоков

Обзор классических моделей транспортного потока, которые должны объяснять и предсказывать переход от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места (“бутылочного горлышка”) на автодороге и последующие пространственно-временные структуры плотного потока, дан в работах [17, 47, 48, 53, 76, 89, 93, 123, 208, 221, 230, 233, 247, 310, 325, 327, 328]. Одной из главных гипотез этих классических моделей транспортного потока является гипотеза о теоретической фундаментальной диаграмме (рис. 1.1 (а)) [17, 47, 48, 53, 76, 89, 93, 208, 221, 225, 230, 233, 247, 325, 327, 328]. Фундаментальная диаграмма для моделей транспортного потока означает, что во всех этих моделях предполагается, что для каждого не зависящего от времени значения скорости автомашины впереди существует только одно желаемое (или оптимальное) расстояние до автомашины впереди, которое автомашина выбирает в гипотетическом случае движения с постоянной скоростью и без флуктуаций. Фундаментальная диаграмма для транспортного потока связана с хорошо известным эмпирическим результатом, чем выше плотность транспортного потока, тем ниже скорость такого потока на автодороге [17, 47, 48, 53, 76, 89, 93, 208, 221, 225, 230, 233, 247, 310, 325, 327, 328].

Классические модели транспортного потока могут быть классифициро-

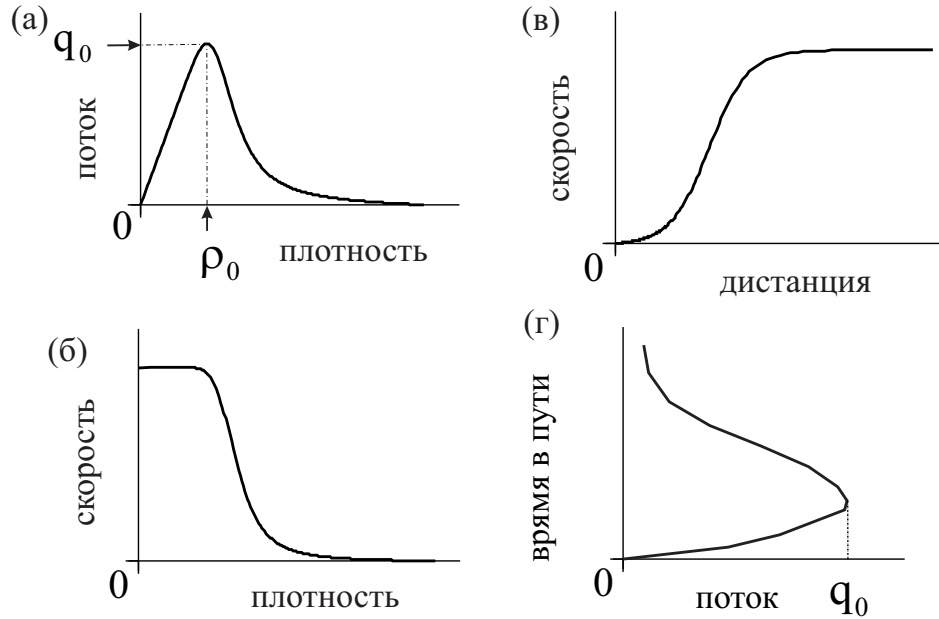


Рис. 1.1: Качественный пример фундаментальной диаграммы: (а) – зависимость поток–плотность (фундаментальная диаграмма); (б–г) – связанные с (а) зависимости скорость–плотность (б), скорость–дистанция (в) и зависимость времени в пути по участку автодороги от величины потока (г) (см., например, [17, 47, 48, 53, 76, 89, 93, 208, 221, 225, 230, 233, 247, 310, 325, 327, 328]).

ваны в два основных класса: Первый класс моделей относится к классической LWR (Lighthill-Whitham-Richards) модели, введенной в 1955-1956 годах [210, 272] (см. также ссылки в [47, 53, 76, 89, 93, 208, 225, 310, 325]). Примером моделей данного класса является СТМ (cell-transmission) модель Daganzo [51, 52]. Основная идея LWR моделей состоит в том, что максимальная величина потока (обозначенная как q_0 на рис. 1.1 (а)), связана с максимальной точкой на фундаментальной диаграмме и определяет пропускную способность свободного транспортного потока вблизи узкого места. Таким образом, если величина потока через узкое место превышает пропускную способность, происходит возникновение автотранспортного затора, т.е. переход к плотному транспортному потоку.

Второй класс моделей относится к классической GM (General Motors) модели, введенной Rothery, Montroll, Chandler и Potts в 1959-1961 годах [46, 82, 83, 97]. Основная идея основанного на GM- модели подхода состоит в следующем. Начиная с некоторой критической плотности транспорт-

ного потока, имеет место неустойчивость стационарных состояний модели на фундаментальной диаграмме. Эта модельная неустойчивость, которая должна объяснять переход к плотному потоку, связана с конечным временем реакции водителя. Неустойчивость может быть качественно объяснена, если предположить, что в исходно однородном транспортном потоке одна из автомашин неожиданно тормозит, что вызывает локальное уменьшение скорости (возмущение скорости) в потоке. Из-за конечного времени реакции водителя следующая автомашина может тормозить сильнее, чем это необходимо, чтобы избежать столкновения. Этот эффект называется переторможением (или избыточным реагированием). В результате такого избыточного торможения скорость следующей автомашины становится меньше, чем скорость предыдущей. Тот же самый эффект переторможения может произойти для других последующих автомашин, что приведет к росту начального возмущения скорости, т.е. к неустойчивости транспортного потока. Примерами моделей GM класса являются модель оптимальной скорости (OV), предложенная Newell [238, 240], Whitham [326], и Bando *et al.* [13–15], макроскопическая модель Payne и ее варианты [258, 259], психофизическая модель транспортного потока, предложенная Wiedemann, и ее варианты [327], модель Gipps [84], NaSch (Nagel-Schreckenberg) модель клеточных автоматов (КА) [16, 232], модель Крауф, модель интеллектуального водителя (IDM), введенная Treiber с соавторами [309, 310], а также огромное число других моделей транспортного потока (см. ссылки в [47, 48, 76, 89, 93, 208, 221, 225, 230, 233, 247, 310, 325, 327, 328]).

1.2. Об исследованиях в области теории и численного моделирования транспортных потоков в Российской Федерации

Большой вклад в развитие теории транспортных потоков внесла отечественная наука, представленная целым рядом научных школ. Подробный обзор вклада советских и российских ученых в теорию транспортных потоков был сделан, в частности, в монографии Буслаева, Новикова, Приходь-

ко, Таташева и Яшиной “Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автодорожного движения” [41], в монографии Буслаева, Таташева и Яшиной “Математическая физика трафика” [43], а также в монографии Приходько, Буслаева “Стохастическое моделирование и оптимизация в автодорожном движении” [42]. В книге Гасникова, Кленова, Нурминского, Холодова и Шамрай приведены различные подходы к моделированию транспортных потоков [78, 81]. Обзор по математическому моделированию транспортных потоков сделал Швецов [278]. Козлов, Буслаев и Таташев в монографии “Monotonic random walks and clusters flows on networks: Models and traffic applications” разработали математическую теорию сетей для моделирования потоков в социально-технических системах, в частности, в транспортных потоках [197].

Необходимо отметить некоторые важные достижения российских ученых по теории и моделированию транспортных потоков, сделанные с последние годы.

Карамзин, Трапезникова, Четверушкин и Чурбанова разработали различные новые модели транспортных потоков для проведения численных экспериментов, в частности, двумерную модель автомобильных потоков [110]. Сухинова, Трапезникова, Четверушкин, Чурбанова предложили двумерную макроскопическую модель транспортных потоков [294]. Трапезникова, Чечина, Чурбанова, Герман, Ермаков, Фурманов, Липп разработали двумерную модель клеточных автоматов для описания динамики транспортных потоков на элементах улично-дорожной сети [307, 308, 316]. Трапезникова, Чечина, Чурбанова, Поляков провели математическое моделирование потоков автотранспорта на основе макро- и микроскопических подходов [317, 318].

Луканин, Буслаев, Трофименко и Яшина изучили влияние транспортных потоков на окружающую среду [213]. Бугаев, Буслаев и Яшина разработали новые методы решения транспортных задач в мегаполисах [33]. Буслаев и Козлов предложили нелинейные модели для взаимодействующих машин в транспортном потоке [40].

Бугаев, Буслаев, Козлов, Таташев и Яшина разработали математические теории для решения транспортно-логистических задач и моделирова-

ния транспортных потоков в сетях [37, 38].

Киселев, Кокорева, Никитин, Смирнов предложили новую математическую модель двухполосного транспортного потока на основе методов механики сплошной среды и провели математическое моделирование по регулированию транспортных потоков на светофорах [187, 188]. Смирнов, Киселев, Никитин, Сильников, Маненкова, Смирнова, Богданова, Пестов и Тюренкова разработали несколько моделей транспортного потока на многополосных дорогах [288–291]. Богданова, Маненкова, Смирнов и Киселев провели оригинальные исследования связи транспортных потоков и психологии водителей [25]. Регирер, Смирнов и Ченчик разработали математическую модель взаимодействия движущихся коллективов: общественного транспорта и пассажиров [266].

Лубашевский, Гусейн-заде и Гарнисов рассмотрели фазовые состояния транспортных потоков в туннелях [212]. Маслов, Лубашевский, Гусейн-заде провели анализ нелинейной динамики транспортных потоков, а также влияние на транспортные системы различных социальных систем [223, 224].

Холодов Я.А., Холодов А.С., Гасников, Морозов и Тарасов провели новые численные исследования транспортных потоков на основе гидродинамических моделей [227, 331]. Холодов Я. А., Алексеенко, Холодов А. С., Горева, Васильев, Чехович, Мишин и Старожилец провели разработку, калибровку и верификацию модели движения трафика в городских условиях [3, 98].

Гасников рассмотрел эффективность вычисления конкурентных равновесий в транспортно-экономических моделях [79]. В работе Гасникова, Дорна, Нестерова и Шпирко предложена и изучена трехстадийная версия модели стационарной динамики в транспортных потоках [80]. Гасников, Дорн, Нурминский и Шамрай рассмотрели влияния автомобильных пробок на коллапс в городской транспортной сети [81].

Блинкин и Кончева изучили особенности транспортных систем в российских городах [35].

Алиев, Стрельников, Швецов, Шершевский, Мазурин и Максимова разработали теорию моделирования транспортных потоков в крупных городах с применением к московской агломерации [7–9]. Швецов разработал новые

алгоритмы распределения транспортных потоков [279].

Афанасьева и Булинская предложили новые стохастические модели транспортных потоков и изучили их решения [1, 2].

Бланк разработал новые аналитические подходы к анализу транспортных потоков [19, 21–23].

Лыков, Малышев и Меликян предложили новые модели динамики транспортного потока [215, 216]. Замятин и Малышев разработали вероятностные подходы для изучения транспортных автомобильных потоков [333].

Нуминский, Пугачев, Шамрай и Седюкевич изучили распределение пассажиропотоков в региональной транспортной системе на основе модифицированных гравитационных моделей [241]. Нуминский, Пугачев и Шамрай провели моделирование автомобильных корреспонденций региональной транспортной системы [242, 244]. Нурминский, Федосеев, Тормозов изучили автоматическое определение плотности автомобильного потока по данным видеокамер [245].

Малинецкий и Семенов провели анализ дорожного движения с точки зрения фундаментальных исследований [222]. Семенов рассмотрел новые подходы к математическому моделированию динамики транспортных потоков [281–283].

Валуев разработал квазистационарный подход к математическому моделированию динамики транспортных потоков в городских транспортных сетях [320]. Неймарк, Федоткин М.А., Федоткин А.М. и Кудрявцев предложили различные методы управления транспортным потоком на перекрестках автодорог [73, 235].

Курц и Ануфриев разработали новые численные методы для решения моделей транспортного потока [203, 204].

1.3. Эмпирические исследования свободного и плотного транспортного потока

Автомобильные транспортные потоки в транспортных сетях происходят в пространстве и времени. Поэтому, чтобы понять свойства автомобильных транспортных потоков, должны быть изучены и поняты реальные данные, измеренные в пространстве и времени. По этой причине, эмпирическим базисом любого реалистичного моделирования транспортного потока является *пространственно-временной* анализ эмпирических, т.е. реальных, данных. Другими словами, эмпирические пространственно-временные явления в транспортных потоках являются базисом для разработки методов управления транспортными потоками и их оптимизации, а также для разработки широкого спектра различных интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Примерами таких ИТС являются системы ассистента водителя в автомобиле, системы коммуникации между автомобилями и между автомобилем и инфраструктурой (названная V2X-коммуникацией), автоматически управляемые автомобили, индивидуальные и коллективные ИТС для управления и регулирования транспортными потоками и их динамического распределения в сетях.

Существует огромное количество эмпирических исследований транспортного потока, моделей и теорий транспортного потока, исследований поведения водителей, теоретических методов для динамического распределения транспортных потоков, управления и оптимизации в транспортных сетях, разработанных несколькими поколениями исследователей (см., например, [1, 2, 7–9, 11, 12, 19–25, 34, 36, 39, 40, 71, 72, 81, 86, 87, 90, 91, 110, 124–128, 187, 188, 203, 204, 212, 215, 216, 222–224, 227–229, 231, 241–243, 250–257, 266, 278–284, 286, 288–291, 294, 307, 308, 316–318, 331, 333], а также ссылки в обзорах и трудах конференций [17, 32, 33, 35, 41–43, 47, 48, 53, 70, 76, 89, 93, 123, 138, 139, 197, 198, 208, 213, 214, 221, 225, 230, 233, 247, 310, 325, 327, 328]).

При достаточно низкой плотности, взаимодействие между автомашинами в свободном транспортном потоке несущественно. Поэтому, автомашины имеют возможность двигаться с максимальной желаемой скоростью

(если только эта скорость не ограничена дорожными условиями или правилами дорожного движения). По мере того, как плотность возрастает, взаимодействие между автомобилями уже больше нельзя не учитывать. В результате этого взаимодействия в свободном транспортном потоке средняя скорость движения уменьшается с увеличением плотности (данные измерений слева от штриховой линии FC на рис. 1.2 (а)).

Данная зависимость приводит к так называемой *фундаментальной диаграмме для свободного транспортного потока*, т.е., к некоторой кривой с положительным наклоном, которая описывает величину потока как функцию плотности. Эта кривая получается в результате усреднения данных измерений, показанных слева от прямой FC на рис. 1.2 (а), так, что каждому значению потока отвечает одно значение плотности (кривая F на рис. 1.2 (б)) (например, [47, 48, 53, 93, 95, 99, 218, 225, 239, 263, 325, 327]).

Фундаментальная диаграмма для свободного транспортного потока обрывается в некоторой эмпирической предельной (максимальной) точке, обозначенной как $(\rho_{\max}^{(\text{free, emp})}, q_{\max}^{(\text{free, emp})})$ на рис. 1.2 (б) (например, [91, 225]). В этой предельной точке средняя скорость имеет минимально возможную величину для свободного потока. Таким образом, эмпирические точки, отвечающие свободному потоку, также, как и соответствующая фундаментальная диаграмма, лежат левее штриховой линии FC в плоскости поток–плотность, причем наклон этой линии равен минимально возможной скорости в свободном потоке $v_{\min}^{(\text{free, emp})}$.

Используется следующее определение плотного транспортного потока [47, 48, 93, 95, 99, 200, 218, 239, 263, 325, 327]. Состояния плотного потока определяются как дополнительные к состояниям свободного потока. Как уже отмечалось, эмпирические точки, относящиеся к свободному потоку, могут быть приближенно представлены кривой с положительным наклоном в плоскости поток–плотность (рис. 1.2 (б)). Плотный поток определяется поэтому как состояние транспортного потока, в котором средняя скорость *меньше*, чем минимально возможная скорость в свободном потоке, соответствующая предельной точке $(\rho_{\max}^{(\text{free, emp})}, q_{\max}^{(\text{free, emp})})$ (рис. 1.2 (б)). Таким образом, эмпирические точки плотного потока лежат в плоскости поток–плотность правее штриховой линии FC , наклон которой равен

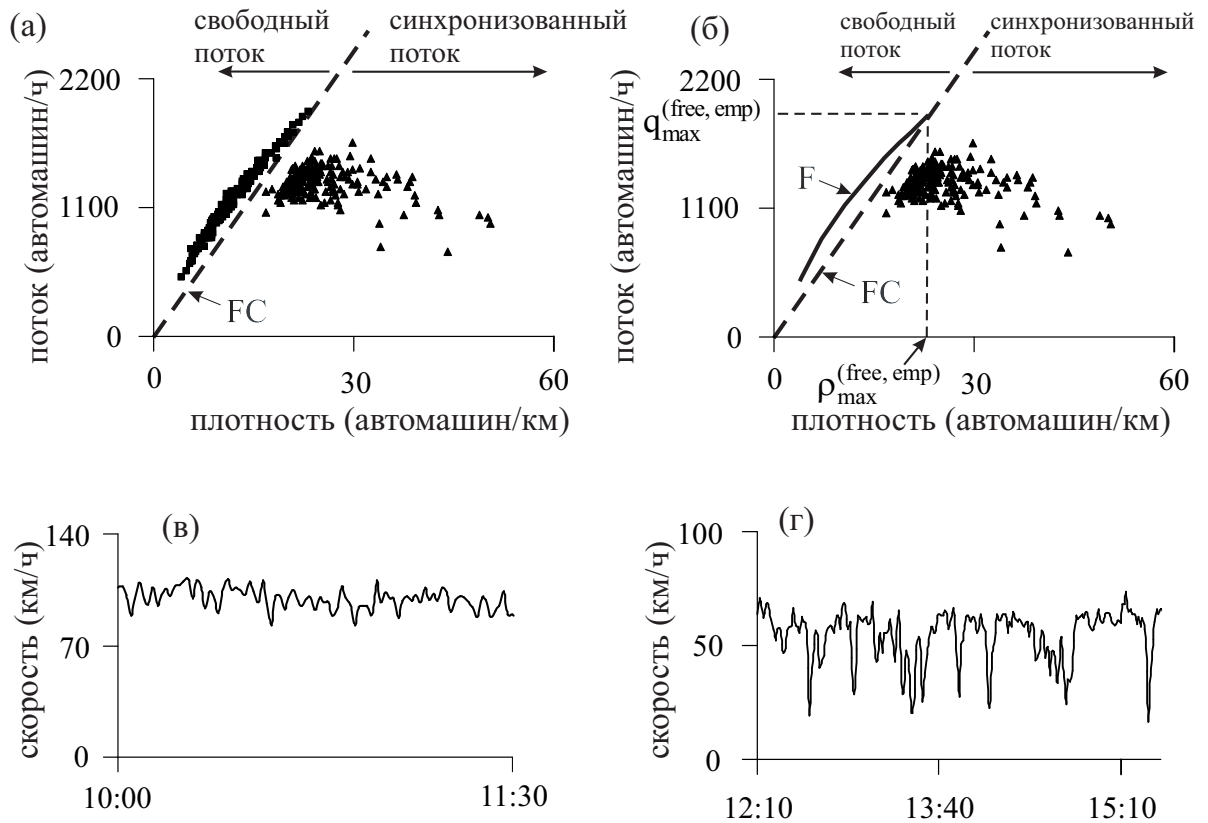


Рис. 1.2: Свободный транспортный поток и плотный транспортный поток в эмпирических данных (например, [200]): (а) – данные для свободного потока (точки левее штриховой линии FC) и для плотного потока (точки правее штриховой линии FC), измеренные детектором на автодороге; (б) – фундаментальная диаграмма для свободного потока (кривая F) и приведенные на (а) данные для плотного потока; (в, г) – скорость в свободном потоке (в) и плотном потоке (г), показанная для данных на (а) соответственно слева и справа от линии FC . 1-минутные данные.

минимально возможной скорости в свободном потоке.

Возникновение заторов в транспортных потоках на автодорогах является повседневным фактором жизни для многих автомобилистов в любой промышленно развитой стране. Дорожный затор обычно возникает в результате перехода от свободного к плотному транспортному потоку. Такой переход и последующее возникновение сложных структур плотного транспортного потока обычно происходит вблизи узкого места на автодороге (“бутылочного горлышка”). По этой причине, пропускная способность свободного транспортного потока на автодороге ограничена переходом к плотному потоку, происходящем вблизи узкого места (см., например, [11, 12, 70–72, 90, 91, 225] и ссылки в этих публикациях, а также ссылки в Главе 2 книги [138]).

Начиная с классической работы Greenshields и др. [85], значительные усилия были сделаны различными научными группами, чтобы понять эмпирические свойства перехода к плотному транспортному потоку (см., например, [11, 12, 70–72, 90, 91, 225], а также ссылки в Главе 2 книги [138]).

Эмпирические исследования показывают, что в течении перехода от свободного к плотному транспортному потоку резко уменьшается скорость потока (рис. 1.3 (а, б)). Напротив, после того, как переход к плотному потоку произошел, величина потока может остаться такой же большой (рис. 1.3 (в)), как и в исходном свободном потоке до перехода (обозначенном как “Спонтанный переход к плотному транспортному потоку” на рис. 1.3). Таким образом, переход к плотному потоку всегда сопровождается резким *скачкообразным* уменьшением скорости транспортного потока [11, 12, 70–72, 90, 91, 225].

Существует также хорошо известное явление гистерезиса, связанное с переходом к плотному потоку и обратным переходом к свободному потоку (см., например, [11, 12, 70–72, 90, 91, 225], а также ссылки в Главе 2 книги [138]).

В 1995 году, Elefteriadou вместе с соавторами установили, что переход от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автостраде имеет стохастический (вероятностный) характер [70, 72]. Это означает следующее: при заданной величине потока через узкое место пе-

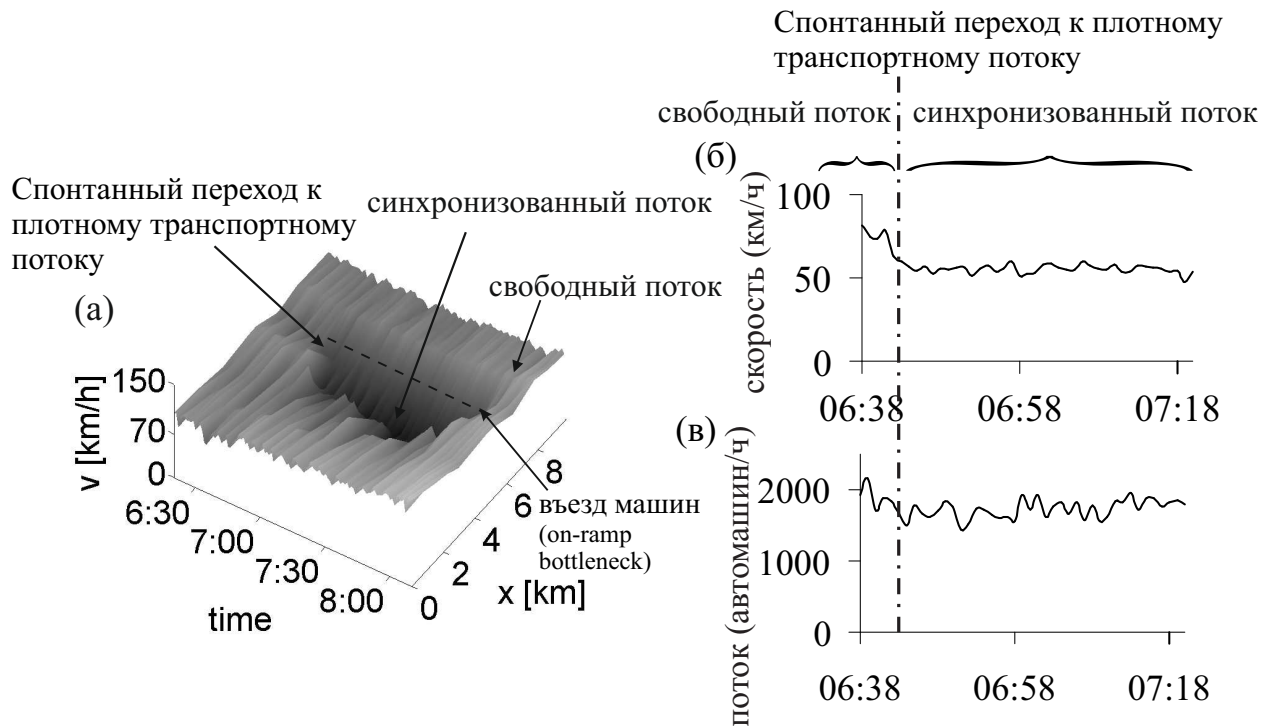


Рис. 1.3: Эмпирический пример перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи бутылочного горлышка из-за въезда на авто-страду: (а) – усредненная скорость потока в пространстве и времени (1-минутный интервал усреднения); (б, в) – усредненные скорость (б) и величина потока (приведенная к одной полосе) (в), измеренные детектором на автостраде вблизи въезда в точке с координатой $x = 6.4$ км. Реальные данные дорожных детекторов, взятые из книги [123], которые были измерены на 3-х полосной автостраде А5-Юг в Германии 26 марта 1996г. Эти данные показывают качественно те же самые общие свойства, что были измерены на множестве автомагистралей в разных странах мира (см., например, [11, 12, 70–72, 90, 91, 225], а также ссылки в Главе 2 книги [138]).

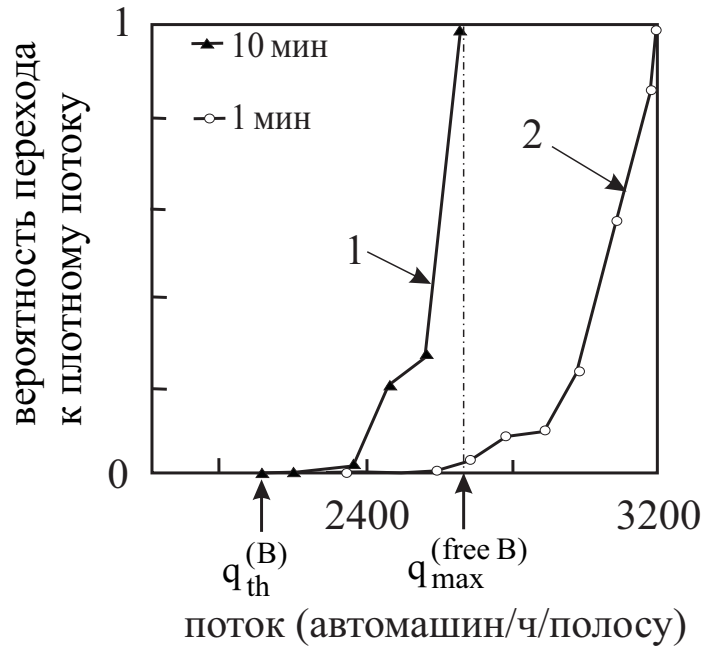


Рис. 1.4: Вероятность перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места из-за въезда на автостраду для двух различных значений времени усреднения потока $T_{av} = 1$ и 10 мин. Взято из Persaud *et al.* [260].

Переход к плотному потоку может произойти, но не обязательно должен произойти. В один день переход к плотному потоку происходит, а в другой день при той же самой величине потока такой переход не наблюдается.

В 1995 году, Persaud с соавторами нашли, что вероятность $P^{(B)}$ перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автодороге является резко растущей функцией величины потока (рис. 1.4). Такой характер вероятности перехода $P^{(B)}$ качественно не зависит от времени усреднения потока T_{av} . Однако, увеличение времени усреднения приводит к уменьшению величины потока, при которой вероятность перехода $P^{(B)} = 1$ (кривые $T_{av} = 1$ мин и 10 мин на рис. 1.4). Одна из причин такого поведения вероятности перехода $P^{(B)}$ как функции величины потока является то, что в эмпирических данных величина потока обычно сильно меняется во времени. В результате, в данных при усреднении по 10 мин (рис. 1.4) могут быть 1-минутные значения потока, которые существенно выше, чем среднее значение потока при усреднении за 10 мин [260].

Растущий характер зависимости вероятности $P^{(B)}$ перехода от свобод-

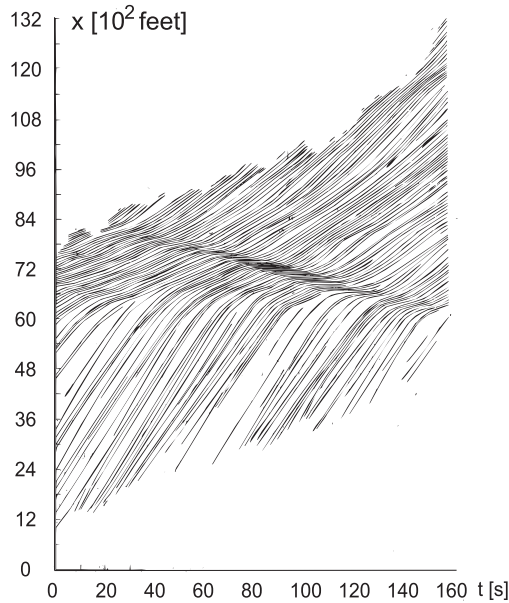


Рис. 1.5: Эмпирический движущийся кластер в транспортном потоке: динамика движения получена с помощью аэрофотосъемки. Данные Treiterer [315].

ного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места был также найден исследователями Lorenz и Elefteriadou [211] для автомагистралей в США, а также исследователями Brilon с соавторами [27–29] для 5-минутных данных на автомагистралях в Германии. Эти результаты качественно аналогичны ранее полученным Persaud и его соавторами [260].

В плотном транспортном потоке может наблюдаться так называемое явление “стоп-энд-гоу”, т.е. последовательность движущихся заторов (движущихся кластеров) [66–69, 199, 200, 313–315].

Движущийся кластер в транспортном потоке представляет собой локализованную структуру плотного транспортного потока, которая движется как целое против потока (вверх по течению). Внутри такого движущегося кластера скорость автомашин очень мала (иногда близка к нулю), а плотность, наоборот, очень велика. Движущийся кластер ограничен в пространстве двумя фронтами, передним и задним. На заднем (по потоку) фронте кластера автомашины ускоряются из состояний низкой скорости внутри кластера до более высокой скорости в транспортном потоке позади кластера. В пределах переднего (по потоку) фронта кластера автомаши-

ны должны тормозить до низкой скорости внутри кластера. Оба фронта кластера движутся против потока. На фронтах кластера скорость автомашин, плотность и величина потока резко меняются. Движущиеся кластеры изучались эмпирически многими авторами, в частности, в классических эмпирических работах Edie с соавторами [66–69], Treiterer с соавторами [312–315], и Koshi с соавторами [199, 200] (см. другие ссылки на эмпирические и теоретические результаты исследований движущихся кластеров например в [47, 93, 123, 230, 233, 268, 269, 310]).

В соответствии с теорией движущихся кластеров, впервые разработанной Kerner и Konhäuser [179], при изучении эмпирических данных было найдено [182–184], что движущийся кластер обладает характеристическими параметрами, которые не зависят от начального состояния. В частности, движущийся кластер может распространяться по автодороге, поддерживая постоянную среднюю скорость заднего по потоку фронта движущегося кластера.

1.4. Эмпирическая метастабильность перехода от свободного к плотному транспортному потоку и появление теории трех фаз Кернера

Пользователи дорожно-транспортных сетей ожидают, что с помощью применения методов эффективного управления транспортными потоками, динамического распределения транспортных потоков по сети и других методов динамической оптимизации, переход к плотному транспортному потоку может быть предотвращен, и, таким образом, может поддерживаться свободный поток во всей транспортной сети. В самом деле, транспортные заторы, возникающие в результате перехода к плотному транспортному потоку, вызывают значительное увеличение времени в пути, расхода топлива и других транспортных расходов по сравнению со случаем свободного потока. Хорошо известно, что после того, как сильный транспортный затор

образуется в транспортной сети, исключительно сложно с использованием ИТС устранить такой сильный затор или даже ограничить его распространение вверх по сети. Это приводит к хорошо известному выводу, что вместо того, чтобы пытаться контролировать сильные транспортные заторы в сети, ИТС должны либо предотвратить возникновение заторов, либо ограничить их развитие по сети.

Это объясняет, почему понимание эмпирических свойств реального перехода от свободного к плотному транспортному потоку имеет фундаментальный приоритет для разработки надежных ИТС. По этой причине, любая теория транспортных потоков, которая заявляется в качестве базиса для разработки надежных ИТС приложений, в частности, таких как автоматическое и кооперированное движение, методы и стратегии управления транспортными потоками, динамическое распределение транспортных потоков по сети, а также динамическая оптимизация сети, должна соответствовать фундаментальным эмпирическим свойствам перехода к плотному потоку вблизи узкого места на автодороге.

Основываясь на анализе реальных эмпирических данных, измеренных на автомагистралях в Германии, Кернер в 1997-1999 годах понял, что переход от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автодороге показывает метастабильную природу [113, 114, 116–118]. Метастабильная природа такого перехода означает, что свободный поток является метастабильным по отношению к переходу к плотному потоку: достаточно малые возмущения скорости в свободном потоке вблизи узкого места затухают и не приводят к переходу, в то время как, если локальное возмущение скорости достаточно большой амплитуды возникает в свободном потоке, то переход к плотному потоку действительно происходит. Такое локальное возмущение скорости большой амплитуды в свободном потоке вблизи узкого места может рассматриваться как “зародыш” для перехода к плотному потоку.

Метастабильная природа реального перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автодороге является фундаментальным эмпирическим свойством такого перехода. Следовательно, Кернер сделал следующий вывод: понимание метастабильной природы ре-

ального перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автодороге имеет фундаментальный приоритет для разработки надежных ИТС [123]. Это объясняет, почему одной из важнейших задач моделирования транспортных потоков является объяснить и смоделировать эмпирическую метастабильную природу перехода к плотному транспортному потоку вблизи узких мест на автодорогах.

Согласно теории трех фаз Кернера [123], в плотном транспортном потоке можно выделить две различные фазы плотного потока: синхронизованный поток и широкий движущийся кластер. При этом, эмпирический переход от свободного к плотному потоку вблизи узкого места на автодороге представляет собой фазовый переход от свободного к синхронизованному потоку ($F \rightarrow S$ переход), который показывает метастабильные свойства.

При рассмотрении реальных данных, в которых наблюдается переход к плотному потоку вблизи узкого места на автодороге, Кернер выделил два различных случая: эмпирический *спонтанный* переход и эмпирический *индуцированный* переход [123, 131]:

- Если перед тем, как произошел переход к плотному потоку вблизи узкого места на автодороге, существует *свободный поток* на этом узком месте, а также впереди и позади от него, тогда эмпирический переход к плотному потоку называется эмпирическим спонтанным переходом.
- В свою очередь, эмпирический индуцированный переход к плотному потоку – это переход, который индуцируется распространением некоторой пространственно-временной структуры *плотного* транспортного потока. Такая структура плотного потока возникла *ранее* и совсем в *другом* узком месте автодороги. Когда в результате распространения по дороге данная структура плотного потока достигает рассматриваемого узкого места, вблизи которого до этого момента сохранялся свободный поток, она индуцирует переход к плотному потоку на этом узком месте.

Пример эмпирического спонтанного перехода от свободного к плотному транспортному потоку показан на рис. 1.3 (а). В самом деле, в этом случае,

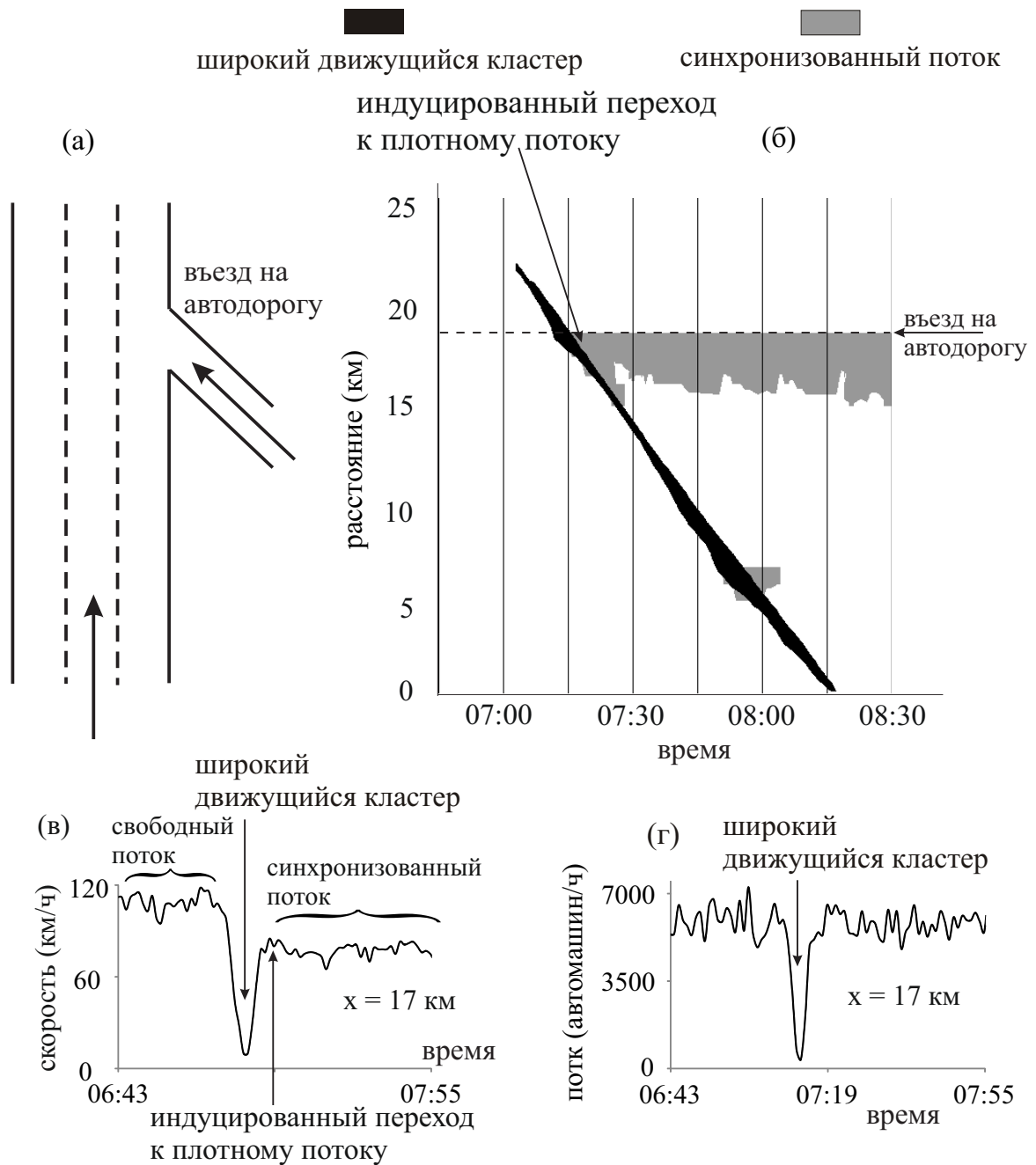


Рис. 1.6: Пример эмпирического индуцированного перехода к плотному потоку вблизи въезда на автодорогу, который индуцирован распространением широкого движущегося кластера: (а) – схематический вид участка трехполосной автодороги с въездом; (б) – данные средней скорости потока, представленные в пространстве и времени, для участка автодороги, показанном на (а); (в, г) – средняя скорость (в) и полный поток по трем полосам (г), измеренные детектором в точке с координатой $x = 17$ км. Реальные данные с дорожных детекторов, измеренные на трехполосной автомагистрали А5-Юг в Германии 23 июня 1998г. Время усреднения данных – 1 мин. Взято из книги [123].

прежде чем происходит переход к плотному потоку вблизи узкого места, связанного с въездом на автодорогу, в окрестности въезда, а также впереди и позади от него, существует свободный поток.

Пример эмпирического индуцированного перехода к плотному транспортному потоку показан на рис. 1.6: широкий движущийся кластер, проходящий через узкое место из-за въезда на автодорогу, *индуцирует* возникновение синхронизованного потока ($F \rightarrow S$ переход) на этом узком месте (индуцированный $F \rightarrow S$ переход обозначен как “индуцированный переход к плотному потоку” на рис. 1.6).

В примере эмпирического индуцированного перехода к плотному потоку (индуцированный $F \rightarrow S$ переход) (рис. 1.6) задний (по потоку) фронт возникшего плотного транспортного потока фиксирован вблизи узкого места, т.е., в соответствии с определением $[S]$, этот плотный поток относится к фазе синхронизованного потока. Синхронизованный поток затем самоподдерживается в течение длительного времени (больше часа) на участке дороги перед узким местом. В примере эмпирического индуцированного перехода (рис. 1.6), после того, как данный переход произошел, характеристики синхронизованного потока, возникшего в результате этого индуцированного перехода, остаются качественно теми же самыми, что были найдены в случае спонтанного перехода вблизи этого узкого места. Другими словами, качественные характеристики синхронизованного потока, возникшего в результате эмпирического перехода к плотному потоку, не зависят от того, был ли это спонтанный или индуцированный переход вблизи узкого места.

- Эмпирический индуцированный переход к плотному потоку вблизи узких мест на автодороге является общим эмпирическим доказательством метастабильного характера такого перехода к плотному потоку; как объяснено в [138, 177], это эмпирическое доказательство не зависит от степени гетерогенности реального транспортного потока.

Чтобы объяснить эмпирическую метастабильную природу перехода к плотному потоку ($F \rightarrow S$ переход) вблизи узких мест на автодороге, в 1996–1999 годах Кернер ввел теорию трех фаз [113, 114, 116–118].

- Основной причиной разработки теории трех фаз Кернера является объяснение эмпирической метастабильной природы перехода к плотному потоку вблизи узких мест на автодороге.

1.5. Основное предположение теории трех фаз Кернера

Чтобы объяснить свойства эмпирических спонтанного и индуцированного переходов вблизи узких мест на автодороге, в теории трех фаз Кернера было сделано следующее фундаментальное предположение [113, 114, 116–118, 123]:

$$P^{(B)}(q_{\text{sum}}) = P_{\text{nucleus}}^{(B)}(q_{\text{sum}}). \quad (1.1)$$

В формуле (1.1), $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$ – это зависящая от величины потока q_{sum} вероятность, что в течении заданного времени наблюдения $T_{\text{об}}$ произойдет спонтанный переход от свободного к плотному потоку вблизи узкого места на автодороге, $P_{\text{nucleus}}^{(B)}(q_{\text{sum}})$ – это зависящая от величины потока q_{sum} вероятность, что в течении заданного времени наблюдения $T_{\text{об}}$ в свободном потоке спонтанно возникнет “зародыш” перехода к плотному потоку вблизи узкого места, q_{sum} – это величина полного потока на автодороге.

1.6. Основные гипотезы теории трех фаз Кернера

Теория трех фаз Кернера – это качественная теория, которая состоит из нескольких гипотез, основывающихся на результатах пространственно-временного анализа реальных данных, измеренных в течении многих лет наблюдения [113, 114, 116–123, 182–184]. Основные гипотезы теории трех фаз, сформулированные Кернером, следующие [113, 114, 116–118, 123]:

1.6.1. Гипотеза 1: Три фазы транспортного потока

В транспортном потоке существуют три различные фазы:

- (i) Свободный поток (F).
- (ii) Синхронизованный поток (S).
- (iii) Широкий движущийся кластер (движущийся затор) (J).

Фазы *синхронизованный поток* и *широкий движущийся кластер* относятся к плотному транспортному потоку. Эмпирические данные, измеренные в разных странах в течение многих лет наблюдения, подтверждают, что транспортный поток состоит из этих трех фаз (рис. 1.7).

Фаза транспортного потока является состоянием транспортного потока, рассматриваемым в пространстве и времени, которое обладает определенными *эмпирическими пространственно-временными* свойствами. Эти свойства являются специфичными (уникальными) только для этой фазы транспортного потока. Заметим, что состояние транспортного потока описывается определенными переменными, показывающими статистические свойства. Такими переменными являются, например, величина потока q (автомашин/ч), скорость автомашин v (км/ч), расстояние (дистанция) до машины впереди g (м), временной интервал (сек) до машины впереди, который также иногда называют чистым временным промежутком между автомашинами, плотность автомашин на дороге (автомашин/км).

В теории трех фаз Кернера фазы *широкий движущийся кластер* и *синхронизованный поток*, относящиеся к плотному транспортному потоку, задаются через их определения [J] и [S] следующим образом (рис. 1.8 и 1.6) [113, 114, 116–118, 123]:

[J] Широкий движущийся кластер – это движущийся кластер, который обладает свойством поддерживать постоянной среднюю скорость заднего (по потоку) фронта кластера, даже когда он движется через другие различные состояния свободного и синхронизованного потоков или же через узкие места на автодороге. Это характеристическое свойство [J] фазы широкого движущегося кластера.

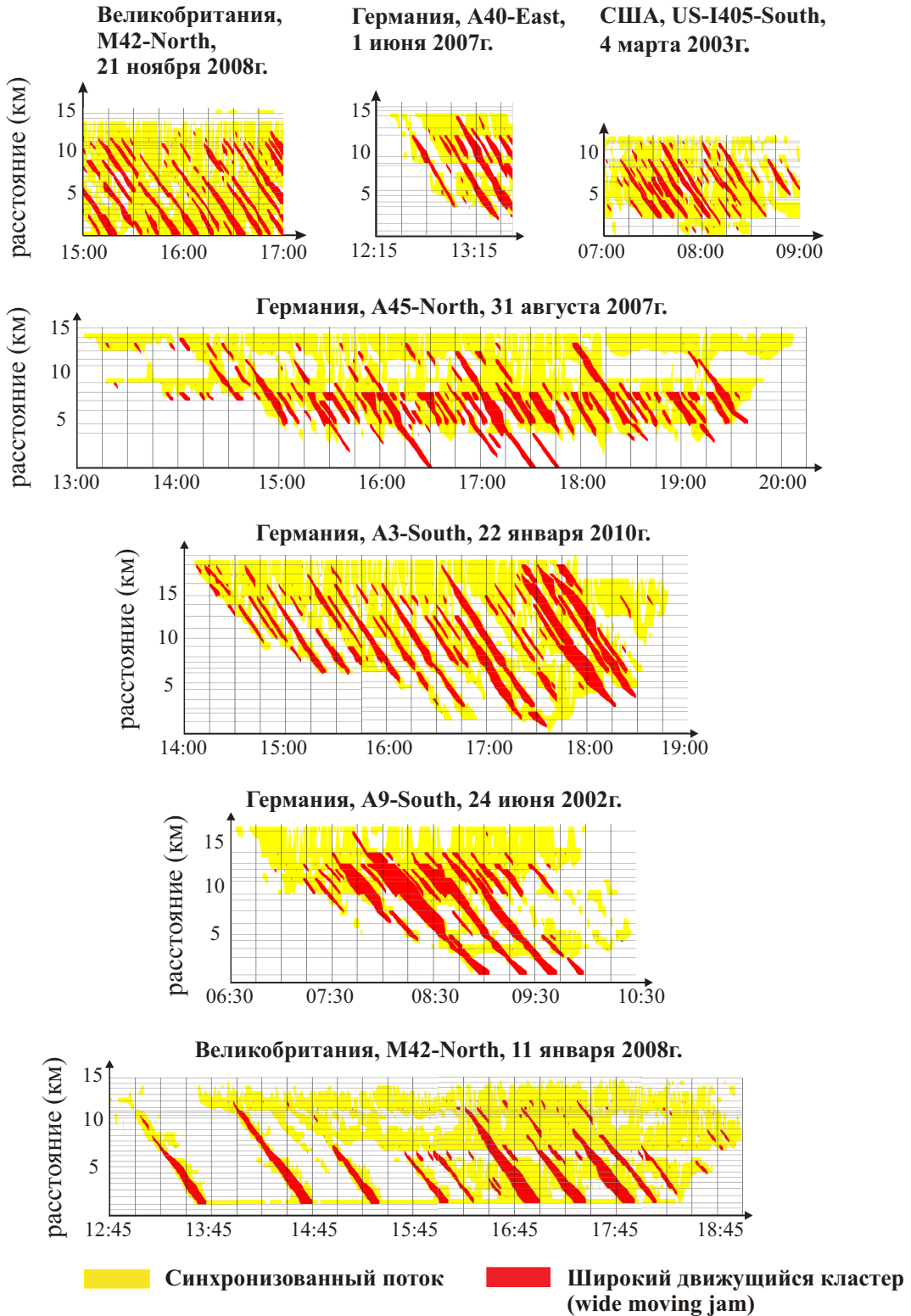


Рис. 1.7: Обзор эмпирических примеров пространственно-временных структур плотного потока, реконструированных с использованием исходных данных, измеренных дорожными детекторами на различных автомагистралях в Великобритании, Германии и США. Рисунок взят из книги [123].

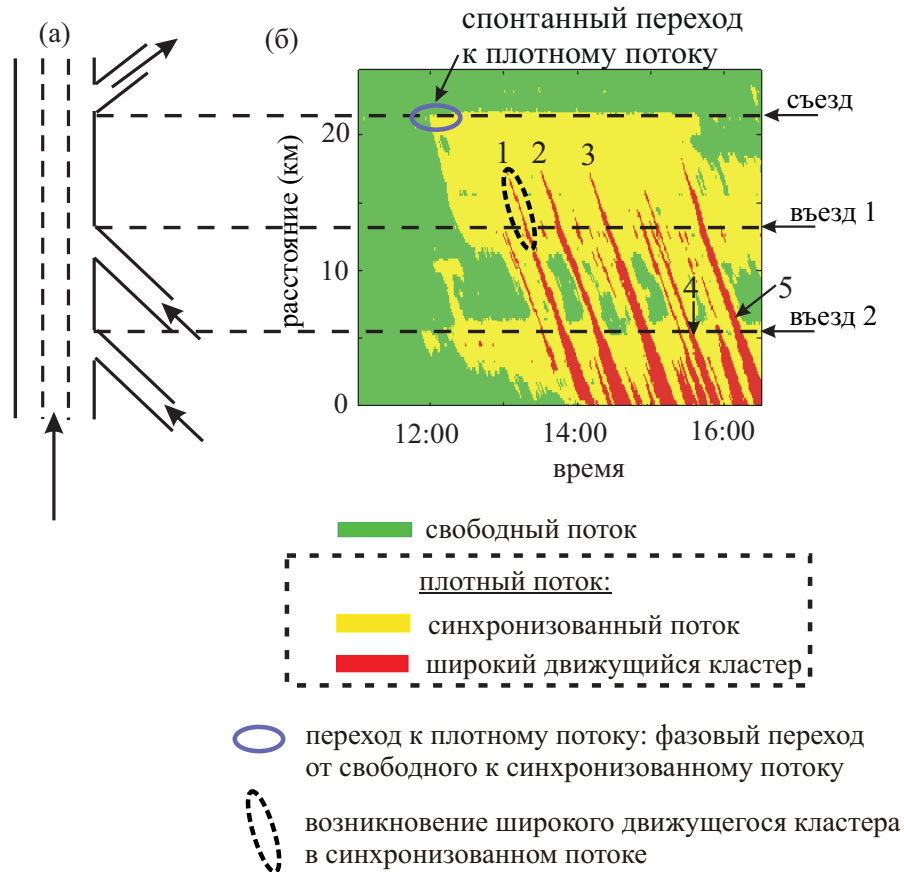


Рис. 1.8: Эмпирический пример спонтанного перехода к плотному потоку с последующим образованием сложной структуры плотного потока, измеренной на трехполосной автостраде А5-Север в Германии 23 марта 2001 года: (а) – схематический вид участка трехполосной автодороги с одним съездом и двумя въездами; (б) – эмпирические данные средней скорости потока, представленные в пространстве и времени с помощью специально разработанного метода усреднения. Взято из книги [123].

[S] В отличие от фазы широкого движущегося кластера, синхронизованный поток *не* поддерживает постоянной среднюю скорость заднего (по потоку) фронта. В частности, задний фронт синхронизованного потока часто *фиксирован* вблизи узкого места на автодороге. Другими словами, фаза синхронизованного потока не показывает характеристическое свойство [J] фазы широкого движущегося кластера.

Движущиеся кластеры, обозначенные номерами 1–5 на рис. 1.8 (б), проходят через узкие места вблизи въезда 1 и въезда 2 соответственно, поддерживая постоянной среднюю скорость заднего фронта. Поэтому, эти движущиеся

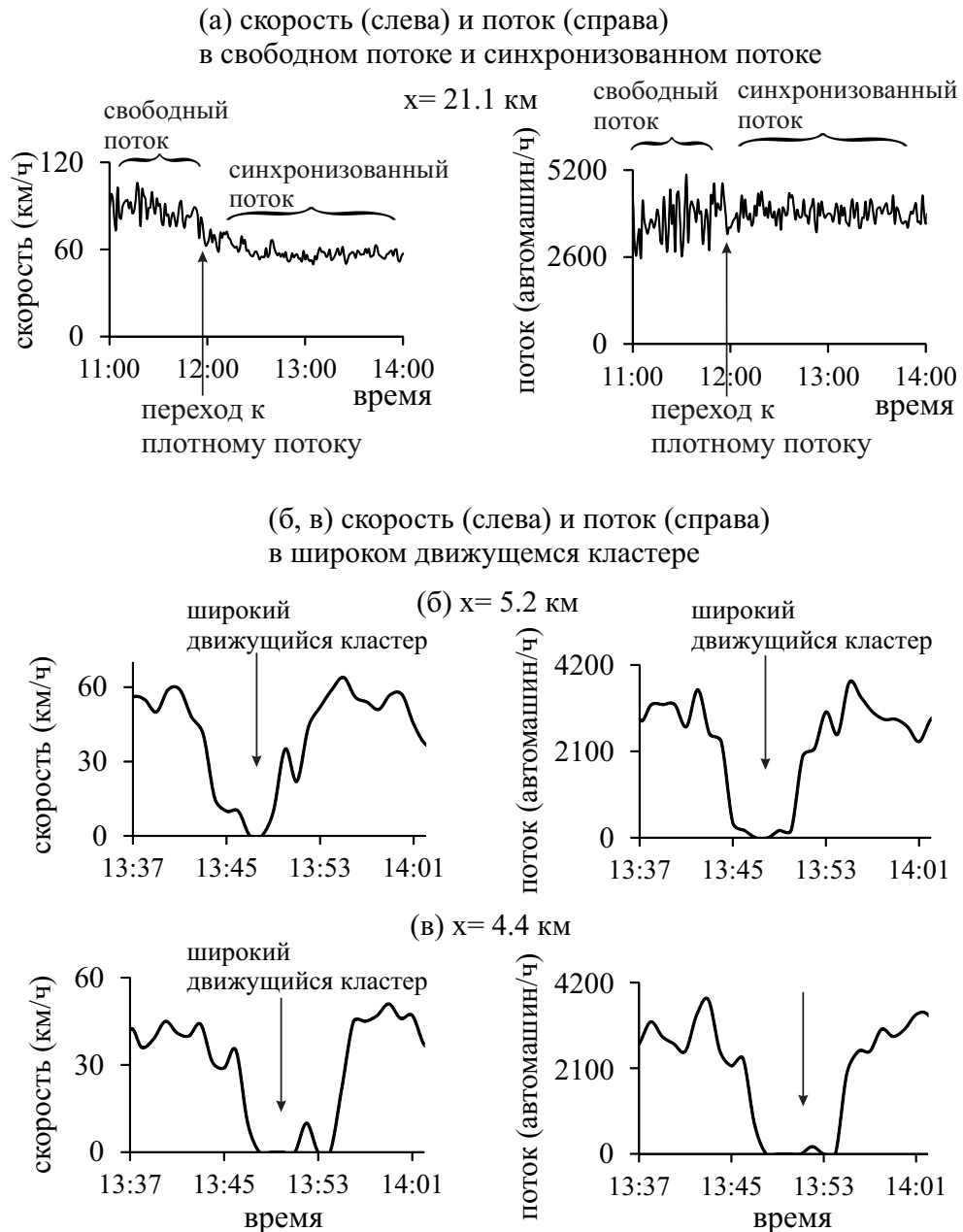


Рис. 1.9: Эмпирические свойства синхронизованного потока (а) и широкого движущегося кластера (б, в), относящиеся к эмпирическим данным на рис. 1.8: (а) – средняя скорость и полный поток по дороге, измеренные детектором в точке с координатой $x = 21.1$ км вблизи съезда с автодороги, где происходит переход к плотному потоку ($F \rightarrow S$ переход); (б, в) Средняя скорость и полный поток по дороге, измеренные детектором в двух точках с координатами $x = 5.2$ км и 4.4 км внутри широкого движущегося кластера, обозначенного “1” на рис. 1.8 (б). Детекторы с координатами $x = 5.2$ км и 4.4 км, мимо которых проходит широкий движущийся кластер, расположены примерно в 15 км вверх по течению от того места ($x = 21.1$ км), где происходит переход к плотному потоку в (а). Взято из книги [123].

щиеся кластеры относятся к фазе широкого движущегося кластера. Еще один движущийся кластер, показанный в другом эмпирическом примере (рис. 1.6 (б)), проходит через узкое место вблизи въезда, также поддерживая постоянной среднюю скорость заднего фронта. Этот движущийся кластер также относится к фазе широкого движущегося кластера.

Задний по течению фронт синхронизованного потока разделяет собственно синхронизованный поток перед узким местом и свободный поток позади него. В пределах этого заднего фронта синхронизованного потока автомашины ускоряются от относительно низких значений скорости в синхронизованном потоке до высоких значений скорости в свободном потоке позади фронта. На рис. 1.8 (б) можно видеть область плотного транспортного потока, у которого задний по течению фронт фиксирован на узком месте вблизи съезда с автодороги (штриховая линия показывает узкое место из-за съезда на рис. 1.8). Таким образом, возникающий в результате перехода плотный поток удовлетворяет критерию $[S]$ для фазы синхронизованного потока. Такой же вывод можно сделать для плотного потока, задний фронт которого фиксирован на узком месте вблизи въезда на автодорогу на рис. 1.6 (б): этот плотный поток также относится к фазе синхронизованного потока.

В фазе синхронизованного потока (S) средняя скорость меньше, чем средняя скорость в фазе свободного потока (F), в то время как величина потока может быть такой же большой, как и в фазе F (рис. 1.6 (б) и 1.9 (а)). В отличие от фазы S, внутри фазы широкого движущегося кластера (J) как скорость, так и величина потока, достаточно малы и иногда даже близки к нулю (рис. 1.6 (г) и 1.9 (б, в)).

1.6.2. Гипотеза 2: Метастабильная природа перехода от свободного к плотному транспортному потоку

Существует метастабильность свободного потока относительно $F \rightarrow S$ перехода вблизи узкого места на автодороге. Метастабильная природа перехода от свободного к плотному транспортному потоку означает следующее: переход к плотному транспортному потоку вблизи узкого места является

$F \rightarrow S$ переходом, который происходит в метастабильном состоянии свободного потока.

1.6.3. Гипотеза 3: Z-характеристика перехода от свободного к плотному транспортному потоку

Метастабильная природа перехода от свободного к плотному транспортному потоку описывается Z-характеристикой для прямого перехода от свободного к синхронизованному потоку ($F \rightarrow S$ переход) и обратного перехода от синхронизованного к свободному потоку ($S \rightarrow F$ переход).

1.6.4. Гипотеза 4: Особенности поведения водителей, приводящие к переходу от свободного к плотному транспортному потоку

Метастабильная природа перехода от свободного к плотному транспортному потоку ($F \rightarrow S$ переход) объясняется пространственно-временной “конкуренцией” между эффектом адаптации к скорости автомашины впереди и эффектом “переускорения”.

1.6.5. Гипотеза 5: Разрывный характер переускорения

Вероятность переускорения как функция плотности потока имеет разрывный характер: это Z-образная функция плотности (рис. 1.10). Вероятность переускорения как Z-образная функция плотности вызвана временной задержкой реакции водителя при переускорении. Разрывный характер вероятности переускорения приводит к неустойчивости синхронизованного потока, вызывающей нарастающие волны локального увеличения скорости в синхронизованном потоке.

Данная неустойчивость синхронизованного потока называется $S \rightarrow F$ неустойчивостью. $S \rightarrow F$ неустойчивость управляет переходом к плотному потоку ($F \rightarrow S$ переход) на узких местах на автодороге.

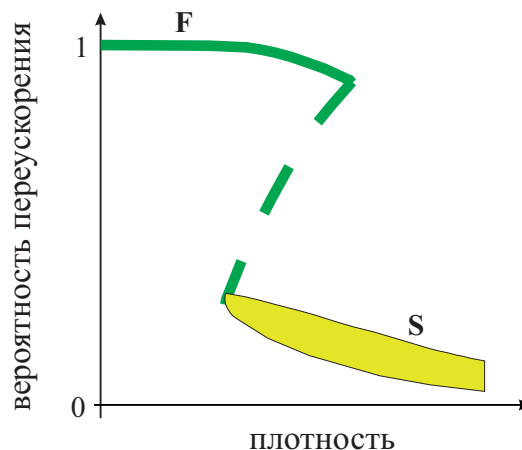


Рис. 1.10: Качественная иллюстрация разрывного характера вероятности переускорения, предполагаемая в теории трех фаз Кернерау [117, 118, 123].

1.6.6. Гипотеза 6: Бесконечное количество значений пропускной способности автодороги в любой момент времени

В любой момент времени, существует бесконечное количество значений пропускной способности автодороги в свободном потоке на узком месте. Эти значения пропускной способности автодороги находятся в диапазоне между минимальной и максимальной пропускной способностью.

1.6.7. Гипотеза 7: Последовательность $F \rightarrow S \rightarrow J$ переходов

Последовательность $F \rightarrow S \rightarrow J$ переходов обуславливает возникновение движущихся кластеров в транспортном потоке: широкие движущиеся кластеры (J) спонтанно возникают только в синхронизованном потоке ($S \rightarrow J$ переход), а не в свободном потоке. Как прямой $S \rightarrow J$ переход, так и обратный $J \rightarrow S$ переход показывают метастабильность, которая описывается Z-характеристикой для $S \rightarrow J$ и $J \rightarrow S$ переходов.

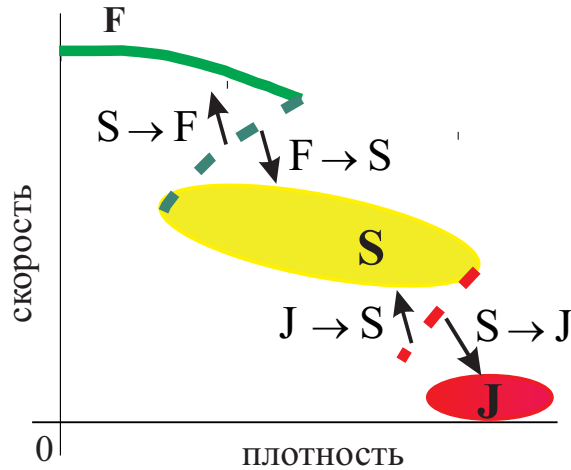


Рис. 1.11: Гипотеза теории трех фаз Кернера для фазовых переходов в транспортном потоке: Качественный вид $2Z$ -характеристики для фазовых переходов [123]. F – фаза свободного потока, S – фаза синхронизованного потока, J – фаза широких движущихся кластеров [123].

1.6.8. Гипотеза 8: Двойная Z-характеристика для фазовых переходов в транспортном потоке

Z-характеристика для перехода от свободного к плотному потоку (гипотеза 3) совместно с Z-характеристикой для $S \rightarrow J$ и $J \rightarrow S$ переходов (гипотеза 7) приводит к двойной Z-характеристике ($2Z$ -характеристика) для фазовых переходов в транспортном потоке.

Эмпирическая метастабильность $F \rightarrow S$ и $S \rightarrow J$ переходов в теории трех фаз Кернера состоит в следующем [113, 114, 116–118, 123]:

- (i) Фазовый переход от свободного к синхронизованному потоку ($F \rightarrow S$ переход) происходит в метастабильном состоянии свободного потока на узком месте автодороги. Смысл термина *метастабильное состояние свободного потока относительно $F \rightarrow S$ перехода на узком месте* следующий. Рассмотрим локальное возмущение скорости в свободном потоке, которое вызывает уменьшение скорости потока вблизи узкого места. Такое возмущение является локализованным вблизи этого узкого места. Будем использовать термин “амплитуда возмущения”: чем больше амплитуда возмущения, тем меньше скорость свободного потока внутри этого возмущения по сравнению со скоростью

свободного потока вне возмущения. Если амплитуда возмущения достаточно мала, то никакого $F \rightarrow S$ перехода не происходит на узком месте автодороги. Однако, если амплитуда локального возмущения скорости в метастабильном свободном потоке равна или превосходит некоторую критическую амплитуду, $F \rightarrow S$ переход действительно происходит. Локальное возмущение скорости, возникшее в метастабильном свободном потоке, которое приводит к $F \rightarrow S$ переходу, называется зародышем (nucleus) для $F \rightarrow S$ перехода. Соответственно, локальное возмущение скорости в метастабильном свободном потоке, которое имеет критическую амплитуду, необходимую для $F \rightarrow S$ перехода, называется критическим зародышем. Другими словами, в реальном транспортном потоке существует метастабильность свободного потока относительно $F \rightarrow S$ перехода вблизи узкого места на автодороге. Как уже упоминалось выше, термин *переход к плотному потоку на узком месте* является синонимом термина *$F \rightarrow S$ переход на узком месте*. Поэтому термин *зародыш для $F \rightarrow S$ перехода на узком месте* является синонимом термина *зародыш для перехода к плотному потоку на узком месте*.

- (ii) Фазовый переход от синхронизованного потока к широким движущимся кластерам ($S \rightarrow J$ переход) происходит в метастабильном состоянии синхронизованного потока относительно $S \rightarrow J$ перехода. Рассмотрим локальное возмущение скорости в синхронизованном потоке, которое вызывает уменьшение скорости потока. Такое возмущение в синхронизованном потоке распространяется против потока. Если амплитуда возмущения в метастабильном синхронизованном потоке достаточно мала, то возмущение затухает со временем. Однако, если амплитуда локального возмущения скорости в метастабильном синхронизованном потоке равна или превосходит некоторую критическую амплитуду, $S \rightarrow J$ переход действительно происходит. Локальное возмущение скорости, возникшее в метастабильном синхронизованном потоке, которое приводит к $S \rightarrow J$ переходу, называется зародышем (nucleus) для $S \rightarrow J$ перехода.

Эти эмпирические результаты (рис. 1.8 и 1.11) приводят к следующему выводу теории трех фаз Кернера [114, 116–118]:

- Широкие движущиеся кластеры возникают спонтанно в свободном транспортном потоке благодаря последовательности двух фазовых переходов. Сначала $F \rightarrow S$ переход происходит вблизи узкого места на автодороге, вызывая образование синхронизованного потока перед этим узким местом. Синхронизованный поток затем распространяется против течения. Внутри этого синхронизованного потока на некотором расстоянии от узкого места спонтанно возникают движущиеся кластеры, т.е. происходит $S \rightarrow J$ переход (рис. 1.8 (б)).

Как $F \rightarrow S$ переход, так и $S \rightarrow J$ переход, которые происходят в пространстве и времени в реальном транспортном потоке (рис. 1.8 (б)), могут быть также представлены на плоскостях скорость–плотность, скорость–поток и поток–плотность в виде двойной Z -характеристики (называемой также $2Z$ -характеристикой) для фазовых переходов (рис. 1.11) [123]. Ясно, что существуют обратные $S \rightarrow F$ и $J \rightarrow S$ переходы между тремя фазами транспортного потока (рис. 1.11). Стрелки $F \rightarrow S$ и $S \rightarrow F$ на рис. 1.11 обозначают, соответственно, $F \rightarrow S$ переход и $S \rightarrow F$ переход в плоскости скорость–плотность, связанные с реальными $F \rightarrow S$ и $S \rightarrow F$ переходами, происходящими в пространстве и времени (рис. 1.8 (б)).

1.6.9. Гипотеза 9: Две качественно различные неустойчивости в синхронизованном потоке

$2Z$ -характеристика для фазовых переходов (рис. 1.11) связана с существованием двух качественно различных неустойчивостей в синхронизованном потоке (рис. 1.12):

- (i) $S \rightarrow F$ неустойчивость: Неустойчивость синхронизованного потока, введенная в теории трех фаз, вызывает нарастающую волну локального **увеличения** скорости в синхронизованном потоке. $S \rightarrow F$ неустойчивость вызвана временной задержкой реакции водителя при

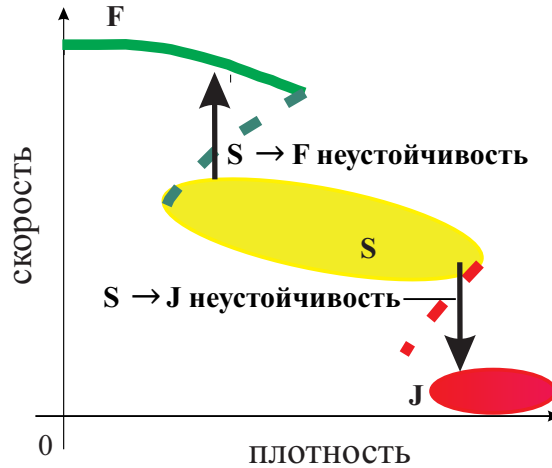


Рис. 1.12: Качественная иллюстрация двух типов неустойчивости в транспортном потоке в теории трех фаз Кернера [138]: В $2Z$ -характеристике для фазовых переходов, первая Z -характеристика является Z -характеристикой для перехода к плотному потоку, которая возникает из метастабильного характера введенной в теории трех фаз $S \rightarrow F$ неустойчивости (обозначена как “ $S \rightarrow F$ неустойчивость” на рис. (a)) [114, 116–118]. Вторая Z -характеристика для $S \rightarrow J$ и $J \rightarrow S$ переходов обусловлена метастабильным характером $S \rightarrow J$ неустойчивости (обозначена как “ $S \rightarrow J$ неустойчивость” на рис. (a)), связанной с классической неустойчивостью транспортного потока, введенной Herman, Gazis, Montroll, Potts, Rothery, и Chandler [46, 82, 83, 97].

переускорении (гипотеза 5 выше). $S \rightarrow F$ неустойчивость ответственна за существование метестабильности свободного потока относительно $F \rightarrow S$ перехода и за Z -характеристику, связанную с $F \rightarrow S$ переходом.

- (ii) $S \rightarrow J$ неустойчивость: Неустойчивость синхронизованного потока вызывает нарастающую волну локального **уменьшения** скорости в синхронизованном потоке. $S \rightarrow J$ неустойчивость приводит к $S \rightarrow J$ переходу. $S \rightarrow J$ неустойчивость связана с классической неустойчивостью транспортного потока, введенной Herman, Gazis, Montroll, Potts, Rothery, и Chandler [46, 82, 83, 97], которая вызвана эффектом переторможения из-за конечной временной задержкой реакции водителя.

1.6.10. Гипотеза 10: Вероятности $F \rightarrow S$ и $F \rightarrow J$ переходов

Существует диапазон значений потоков через узкое место автодороги, в котором свободный поток через это узкое место является метастабильным как относительно $F \rightarrow S$ перехода, так и относительно $F \rightarrow J$ перехода. Однако, при любом значении потока в пределах данного диапазона, амплитуда “зародыша”, требуемого для $F \rightarrow S$ перехода, существенно меньше, чем амплитуда “зародыша”, требуемого для $F \rightarrow J$ перехода. По этой причине, вероятность $F \rightarrow S$ перехода существенно выше, чем вероятность $F \rightarrow J$ перехода. Это объясняет, почему реальный переход к плотному потоку на узком месте автодороги является $F \rightarrow S$ переходом.

1.6.11. Гипотеза 11: 2D-состояния синхронизованного потока

Стационарные состояния синхронизованного потока покрывают двумерную (2D) область на плоскости поток–плотность (также, как и 2D области при любых других возможных представлениях стационарных состояний транспортного потока). Из-за флуктуаций в реальном транспортном потоке “чистые” стационарные состояния транспортного потока не реализуются. Поэтому стационарные состояния синхронизованного потока не могут наблюдаться в реальных данных измерений. Флуктуации разрушают стационарные 2D-состояния синхронизованного потока, трансформируя их в динамические 2D-состояния синхронизованного потока. Однако, в книге [123] (см., например, § 4.3.4 и § 6.3.3 в [123]) Кернер объясняет, что реальные динамические 2D-состояния синхронизованного потока, по крайней мере когда они лишь слабо неоднородны в пространстве и времени, должны проявлять почти те же самые свойства, как и свойства постулированных в теории трех фаз гипотетических стационарных 2D-состояний синхронизованного потока (рис. 1.13) [123].

Стационарные состояния синхронизованного потока представляют собой *гипотетические* состояния синхронизованного потока одинаковых автомашин и одинаковых водителей, в которых все автомашины двигаются

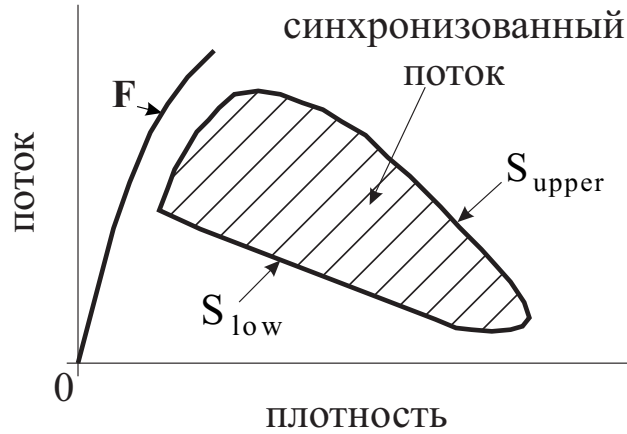


Рис. 1.13: Гипотеза о стационарных состояниях синхронизованного потока в теории трех фаз Кернера [113, 114, 116]: качественное представление состояний свободного потока (F) и стационарных 2D-состояний синхронизованного потока (заштрихованная область) в плоскости поток–плотность для случая многополосной дороги.

с одной и той же постоянной скоростью и на одной и той же постоянной дистанции, т.е. такой синхронизованный поток является однородным в пространстве и времени.

Эта гипотеза означает, что только взаимодействие между одинаковыми автомобилями с одинаковыми водителями ответственно за стационарные 2D-состояния синхронизованного потока в соответствии со следующими предположениями о поведении водителей [123]: даже если разница скоростей между двумя последовательными машинами пренебрежимо мала, водитель может осознать, становится ли расстояние до автомашины впереди больше или меньше. Это справедливо для каждой скорости в синхронизованном потоке в пределах некоторого диапазона расстояний между автомобилями. Поэтому можно предположить, что каждому значению стационарной скорости соответствует бесконечное число расстояний между автомобилями; в свою очередь, каждому стационарному значению расстояний между автомобилями отвечает бесконечное число стационарных значений скорости (рис. 1.13).

Верхняя граница 2D-области стационарных состояний синхронизованного потока (обозначенная как S_{upper} на рис. 1.13) определяется *безопасным расстоянием*, обозначенным как g_{safe} . Безопасное расстояние связа-

но с безопасным временным интервалом, обозначенным как τ_{safe} , который определяется из уравнения:

$$g_{\text{safe}}(v) = v\tau_{\text{safe}}(v). \quad (1.2)$$

Нижняя граница 2D-области стационарных состояний синхронизованного потока на плоскости поток–плотность (обозначенная как S_{low} на рис. 1.13) определяется *расстоянием синхронизации* между автомобилями, обозначенным как G . Расстояние синхронизации связано с временным интервалом синхронизации, обозначенным как τ_G , который определяется из уравнения:

$$G(v) = v\tau_G(v). \quad (1.3)$$

1.6.12. Гипотеза 12: Линия J и $S \rightarrow J$ переход

Линия J – это характеристическая линия на плоскости поток–плотность, описывающая стационарное движение заднего по потоку фронта широкого движущегося кластера. Линия J была введена в теории широких движущихся кластеров, разработанной Кернером и Konhäuser [179]. Наклон линии J определяется средней скоростью заднего фронта широкого движущегося кластера. Средняя скорость заднего фронта широкого движущегося кластера является характеристическим параметром движения такого кластера: эта скорость остается неизменной при движении кластера через различные состояния свободного или синхронизованного потока, а также же через различные узкие места на автодороге.

В теории трех фаз Кернера введена следующая гипотеза о линии J и $S \rightarrow J$ переходе в 2D-состояниях синхронизованного потока [113, 116] (рис. 1.14):

- 1) Все состояния транспортного потока (бесконечное число таких состояний) в плоскости поток–плотность, которые лежат на линии J , являются пороговыми состояниями для возникновения и существования широких движущихся кластеров.
- 2) Линия J разделяет 2D-состояния синхронизованного потока в два

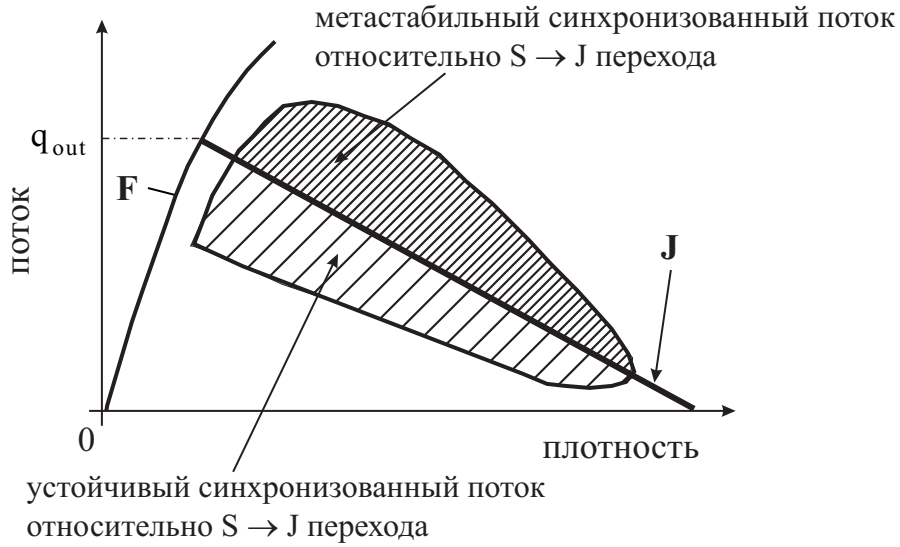


Рис. 1.14: Гипотеза о линии J и $S \rightarrow J$ переходе в 2D-состояниях синхронизованного потока в теории трех фаз Кернера [113, 116]: качественное представление состояний свободного потока (F), стационарных состояний синхронизованного потока (заштрихованная 2D-область), взятых из рис. 1.13, и линия J в плоскости поток–плотность.

различных класса:

- Состояния синхронизованного потока ниже линии J устойчивы относительно $S \rightarrow J$ перехода.
- Состояния синхронизованного потока, которые лежат выше или на линии J , метастабильны относительно $S \rightarrow J$ перехода. В метастабильных состояниях синхронизованного потока может возникать $S \rightarrow J$ неустойчивость, которая приводит к $S \rightarrow J$ переходу.
- Все состояния синхронизованного потока (бесконечное число таких состояний), которые лежат на линии J в плоскости поток–плотность, являются пороговыми состояниями для возникновения широких движущихся кластеров в синхронизованном потоке.

1.7. Основная цель диссертации

Теория трех фаз Кернера – это качественная теория. Для проведения моделирования транспортных потоков или ИТС, необходимы математические модели в рамках теории трех фаз Кернера. Эти модели должны показывать эмпирически наблюдаемую метастабильность перехода от свободного к плотному транспортному потоку на узких местах на автодороге. Также эти модели должны моделировать результирующие структуры плотного транспортного потока, которые наблюдаются в реальных данных. Основной целью диссертации является разработка моделей транспортного потока в рамках теории трех фаз, разработка алгоритмов численного моделирования транспортного потока на основе этих моделей, и проведение численных экспериментов по моделированию свойств транспортного потока, а также различных ИТС приложений.

Глава 2.

Подход клеточных автоматов (КА) к теории трех фаз

2.1. Мотивация для КА моделей в теории трех фаз

В 1992 году Nagel и Schreckenberg [232] ввели модель клеточных автоматов (КА) для транспортного потока. КА модель Nagel и Schreckenberg (NaSch) относится GM классу двухфазных моделей транспортного потока. Одним из главных достижений NaSch модели было следующее: через использование флуктуаций NaSch модель позволила смоделировать классическую неустойчивость в транспортном потоке, введенную Herman, Gazis, Montroll, Potts, Rothery и Chandle [46, 82, 83, 97]. Классическая работа Nagel и Schreckenberg [232] послужила основой для разработки модели клеточных автоматов в рамках теории трех фаз Кернера. В трехфазной КА модели дополнительно к классической неустойчивости транспортного потока, которая используется в моделях GM класса, была введена метастабильность свободного транспортного потока относительно $F \rightarrow S$ перехода, введенная в теории трех фаз Кернера [123] (см. Главу 1).

В результате в 2002 году была разработана трехфазная КА модель [175]. Трехфазная КА модель включает подход Nagel и Schreckenberg для математического описания времени задержки реакции водителя с помощью модельных флуктуаций u и определенные правила движения автомашины для стохастической трехфазной модели, которые позволяют моделировать

метастабильность свободного транспортного потока относительно $F \rightarrow S$ перехода вблизи узкого места на автодороге.

Основной мотивацией для разработки трехфазной КА модели было попытаться сформулировать модель с минимальным числом модельных параметров, которая тем не менее позволяет смоделировать 2Z-характеристику для фазовых переходов в теории трех фаз и свойства пространственно-временных структур плотного потока, постулированные в теории трех фаз Кернера.

Из-за минимального количества модельных параметров в трехфазной КА модели, некоторые свойства модели, например, различные временные задержки водителя при ускорении и торможении, описываются одним и тем же модельным параметром. Чтобы устранить этот недостаток трехфазной КА модели, были также разработаны две другие трехфазные КА модели транспортного потока: КА модель с переускорением из-за смены полосы на двухполосной автодороге [172] и КА модель с ситуативным временем задержки водителя при ускорении, в которой время задержки зависит от предыдущего поведения водителя [167]. Поскольку трехфазная КА модель 2002 года [175] является наиболее простой, именно с этой модели начинается рассмотрение в следующем параграфе 2.2. Трехфазная КА модель с ситуативным временем задержки водителя при ускорении рассматривается в § 2.3.

2.2. Правила движения для трехфазной КА модели

2.2.1. Детерминированные правила движения (без стохастической составляющей)

В трехфазной КА модели транспортного потока с одинаковыми автомобилями и водителями используются следующие детерминированные правила движения [175] для вычисления скорости на следующем временном шаге

без ее стохастической составляющей:

$$v_{n+1} = \max(0, \min(v_{\text{free}}, v_{s,n}, v_{c,n})), \quad x_{n+1} = x_n + v_{n+1}\tau, \quad (2.1)$$

$$v_{c,n} = \begin{cases} v_n + a\tau & \text{for } g_n > G_n, \\ v_n + a\tau \text{sgn}(v_{\ell,n} - v_n) & \text{for } g_n \leq G_n, \end{cases} \quad (2.2)$$

где $\text{sign}(x)$ равно 1 при $x > 0$, 0 при $x = 0$, и -1 при $x < 0$; v_n и x_n – это соответственно скорость автомашины и координата ее передней части; индекс n отвечает дискретному времени $t = n\tau$, $n = 0, 1, 2, \dots$; τ – временной шаг; v_{free} – максимальная скорость автомашин в свободном потоке, которая предполагается одинаковой для всех автомашин; $v_{c,n}$ – желаемая скорость; нижний индекс ℓ обозначает функции и величины, относящиеся к автомашине впереди, т.е., $v_{\ell,n}$ и $x_{\ell,n}$ – это соответственно скорость и координата автомашины впереди; $g_n = x_{\ell,n} - x_n - d$ – расстояние (дистанция) между автомашинами, d – длина автомашины, которая включает также среднее расстояние между автомашинами, остановившимися внутри широкого движущегося кластера; $G_n = G(v_n)$ – расстояние синхронизации; a – ускорение, которое в КА подходе предполагается одинаковым для всех автомашин; $v_{s,n}$ – безопасная скорость, необходимая, чтобы избежать столкновений.

В рассматриваемой трехфазной КА модели используются дискретные и безразмерные координата x_n и скорость v_n , которые измеряются соответственно в единицах δx и $\delta v = \delta x/\tau$, время t_n измеряется в единицах τ . Интервалы дискретизации выбираются равными $\delta x = 0.5$ м и $\delta v = 0.5$ м/с, временной шаг τ равен 1 с. В формулах (2.1)–(2.2) величина τ равна единице и сохранена для наглядности.

В общем случае, безопасная скорость $v_{s,n}$ зависит от расстояния между автомашинами g_n и от скорости автомашины впереди $v_{\ell,n}$. В рассматриваемой КА модели для безопасной скорости используется формула из классической КА модели Nagel и Schreckenberg [232]:

$$v_{s,n} = g_n/\tau. \quad (2.3)$$

Принципиальным отличием от предыдущих КА моделей (например [232, 328]) является правило для скорости $v_{c,n}$ (2.2), согласно которому ускорение автомашины зависит от того, находится ли предыдущая автомашина в пределах расстояния синхронизации G_n или нет [147]. Правило (2.2) [147, 175] является одним из возможных подходов к моделированию поведения водителя, когда он приближается к синхронизованному потоку или движется внутри синхронизованного потока, т.е. это правило описывает ожидание водителя в конкретных условиях движения. При достаточно больших расстояниях до автомашины впереди, превышающих расстояние синхронизации, водитель просто ускоряется с ускорением a . Напротив, в пределах расстояния синхронизации, если водитель не может обогнать автомашину впереди, то он стремится адаптировать скорость своей автомашины к скорости автомашины впереди, т.е., тормозит, если едет быстрее, и ускоряется, если едет медленнее, чем автомашина впереди.

При адаптации скорости в пределах расстояния синхронизации G_n торможение автомашины не связано с торможением в целях безопасности (которое в модели применяется, чтобы не превысить безопасную скорость $v_{s,n}$). На практике торможение для подстройки скорости в пределах расстояния синхронизации G_n может достигаться даже без нажатия на тормоз просто как результат трения колес о дорогу. Другими словами, торможение для адаптации скорости обычно заметно меньше тормозной способности автомашины. Согласно (2.2), изменение скорости за один шаг в результате торможения или ускорения в пределах расстояния синхронизации G_n дается выражением

$$\Delta v_n = a\tau \text{sign}(v_{l,n} - v_n). \quad (2.4)$$

Нужно подчеркнуть, что правило (2.2) фактически “расцепляет” скорость и дистанцию между автомашинами в плотном транспортном потоке. Это можно видеть, если предположить, автомашины движутся одна за другой с одинаковой скоростью v . Тогда, согласно (2.1)–(2.2), ни скорость, ни расстояние между автомашинами не меняются, при условии, что все эти расстояния находятся в диапазоне между минимальной безопасной дистанцией $v\tau$ и расстоянием синхронизации $G(v) \geq v\tau$. В модели нет ни

зависящей от скорости дистанции, предпочитаемой при движении автомашины в потоке, ни зависящей от дистанции оптимальной скорости. Это принципиальное отличие между КА моделями в рамках теории трех фаз и КА моделями, использующими фундаментальную диаграмму, а также причина того, что стационарные состояния в трехфазных КА моделях покрывают двумерную область на плоскости поток–плотность (рис. 2.1 (а)), в то время как стационарные состояния в моделях с фундаментальной диаграммой лежат на некоторой кривой (на теоретической фундаментальной диаграмме, рис. 1.1 (а)).

2.2.2. Расстояние синхронизации

Правила (2.1), (2.2) являются базисными для рассматриваемой модели клеточных автоматов. Они допускают различные формулировки для флуктуаций, ускорения, торможения и расстояния синхронизации G_n , которые приводят качественно к тем же самым свойствам фазовых переходов и структур плотного потока, а также к той же самой диаграмме этих структур, которые были постулированы в теории трех фаз Кернера [113, 116, 121, 122] (Глава 1).

Это, в частности, относится к двум различным формулировкам для расстояния синхронизации G_n как функции скорости: $G_n = G(v_n)$. В первом случае расстояние синхронизации G_n в (2.2) является линейной функцией скорости:

$$G(v_n) = kv_n\tau. \quad (2.5)$$

Во втором случае расстояние синхронизации G_n в (2.2) является нелинейной функцией скорости:

$$G(v_n) = v_n\tau + \phi v_n^2/2a. \quad (2.6)$$

В (2.5) и (2.6) k и ϕ - положительные константы. Обе формулировки приводят к 2D-области стационарных состояний КА модели на плоскости поток–плотность (рис. 2.1).

2.2.3. Стационарные состояния

В КА моделях в рамках теории трех фаз с регулярными правилами (2.1), (2.2), водитель в пределах расстояния синхронизации G_n адаптирует свою скорость к скорости машины впереди, не заботясь о том, каким точно является расстояние до машины впереди, до тех пор пока оно превышает минимально безопасное. По этой причине, для стационарных состояний КА модели в рамках теории трех фаз отсутствует однозначная зависимость величины потока от его плотности.

В стационарных состояниях ускорения всех автомашин равны нулю, поэтому индекс n вышеприведенных формулах может быть опущен. Согласно формулам (2.1)–(2.2), имеются две возможности: или расстояния синхронизации $G(v)$ меньше g , и тогда скорость $v = v_{\text{free}}$, или же

$$G(v) \geq g \quad \text{and} \quad v = v_\ell \leq \min(v_{\text{free}}, v_s(g, v)). \quad (2.7)$$

В стационарном состоянии скорости всех автомашин в потоке одинаковы. Стационарные состояния определяются как решения детерминистической модели (2.1)–(2.2), в которых все машины движутся на одном и том же расстоянии и с одинаковой постоянной скоростью, т.е. решения, отвечающие стационарным состояниям, не зависят от времени и пространственно однородны.

Плотность ρ и величина потока q связаны с дистанцией g и скоростью v следующим образом:

$$\rho = 1/(x_\ell - x) = 1/(g + d), \quad q = \rho v = v/(g + d). \quad (2.8)$$

Поскольку в КА модели v и g являются целыми числами, стационарные состояния не формируют непрерывную область. Однако, неравенства (2.7) определяют двумерную область, внутри которой находятся стационарные состояния на плоскости поток–плотность. Эта область ограничена тремя границами (рис. 2.1), верхней линией U , нижней кривой L , и левой линией F .

Левая граница F задается соотношением $q = \rho v_{\text{free}}$ и отвечает свобод-

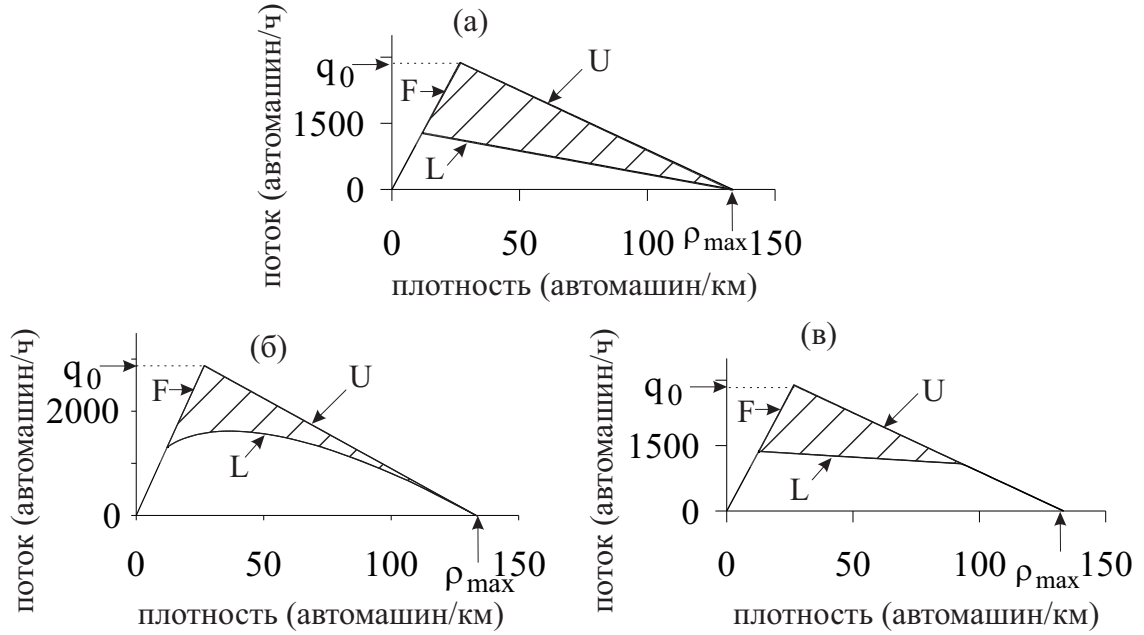


Рис. 2.1: 2D область, отвечающая стационарным состояниям КА модели на плоскости поток–плотность: (а) – КА модель с линейной зависимостью расстояния синхронизации (2.5) от скорости; (б) – КА модель с нелинейной зависимостью расстояния синхронизации (2.6) от скорости. Взято из [175].

ному потоку, где в котором величина потока q не ограничена условием безопасности. На верхней границе U величина потока q определяется безопасной скоростью v_s . Например, подставляя (2.3) в (2.8), для потока q на верхней границе U получим:

$$q = \rho v_s = (1 - \rho d) / \tau. \quad (2.9)$$

Нижняя граница L определяется расстоянием синхронизации G : Для стационарного состояния с плотностью ρ и скоростью $v < v_{\text{free}}$ должно выполняться условие $G(v) + d \geq 1/\rho$, в котором равенство достигается на нижней границе L . Например, используя (2.5), для нижней границы L получим (рис. 2.1 (а)):

$$q = (1 - \rho d) / k \tau. \quad (2.10)$$

Для второй модели (2.6), нижняя граница L описывается нелинейной

зависимостью (рис. 2.1(б)):

$$q = \frac{\tilde{\rho}}{\tau} \left(\sqrt{1 + \frac{2}{\tilde{\rho}}(1 - \rho d)} - 1 \right), \quad \text{with} \quad \tilde{\rho} = \frac{\rho \tau^2 a}{\phi}. \quad (2.11)$$

Для данной кривой (2.11) верхняя линия U является касательной в точке $\rho = \rho_{\max} = 1/d$. Это, в частности, позволяет получить в КА модели диаграмму структур плотного потока, предсказанную в теории трех фаз, с помощью добавления в модель наиболее простых флуктуаций (§ 2.2.4), чем это удается сделать в случае линейной зависимости $G(v)$ (2.5).

2.2.4. Стохастическое ускорение и торможение

Как и во многих других моделях транспортного потока (см. ссылки в обзорах [47, 93, 230, 233, 328]), в рассматриваемой трехфазной КА модели переменные, описывающие транспортный поток, являются случайными функциями. Для вычисления скорости v_{n+1} с учетом ее стохастической составляющей используется следующий метод:

На первом этапе, находится предварительное значение скорости каждой автомашины \tilde{v}_{n+1}

$$\tilde{v}_{n+1} = v_{n+1}, \quad (2.12)$$

где скорость v_{n+1} рассчитывается на основе детерминированных правил (2.1)–(2.2). *На втором этапе*, случайные флуктуации $a\tau\chi_n$ (описанные ниже) добавляются к величине \tilde{v}_{n+1} , рассчитанной на первом этапе. *Наконец*, скорость v_{n+1} на временном шаге $n + 1$ рассчитывается по формуле

$$v_{n+1} = \max(0, \min(v_{\text{free}}, \tilde{v}_{n+1} + a\tau\chi_n, v_n + a\tau, v_{s,n})). \quad (2.13)$$

Это означает, что стохастический вклад $a\tau\chi_n$ не может привести к скорости меньше нуля, или к скорости большей, чем может дать детерминированное ускорение a , при этом ограничения скорости сверху значениями v_{free} и $v_{s,n}$ также принимаются во внимание.

Случайные флуктуации χ_n в (2.13) задаются следующим образом:

$$\chi_n = \begin{cases} -1 & \text{if } r < p_b, \\ 1 & \text{if } p_b \leq r < p_b + p_a \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2.14)$$

где $r = \text{rand}(0, 1)$ означает случайную величину, равномерно распределенную между 0 и 1. Должно выполняться также условие $p_a + p_b \leq 1$.

Вероятность случайного уменьшения скорости p_b в (2.14) выбирается различной для скорости $v_n = 0$ и скорости $v_n > 0$:

$$p_b(v_n) = \begin{cases} p_{b0} & \text{if } v_n = 0 \\ p_{b1} & \text{if } v_n > 0, \end{cases} \quad (2.15)$$

где p_{b1} и $p_{b0} > p_{b1}$ являются постоянными. При $v_n = 0$ выражение (2.15) описывает так называемую задержку при старте (“slow-to-start rule”), которая впервые была введена Takayasu и Takayasu [295], а также Barlović и др. [16]: автомашины ускоряются на заднем фронте широкого движущегося кластера со средним временем задержки

$$\tau_{\text{del}}^{(a)} = \frac{\tau}{(1 - p_{b0})}. \quad (2.16)$$

Эта задержка обеспечивает движение широкого движущего кластера через различные состояния свободного и синхронизованного потока, поддерживая постоянной среднюю скорость заднего по потоку фронта кластера.

На заднем по потоку фронте синхронизованного потока (этот фронт разделяет синхронизованный поток вверх по течению и свободный поток вниз по течению) автомашины ускоряются со средним временем задержки

$$\tau_{\text{del, syn}}^{(a)} = \frac{\tau}{(1 - p_{b1})}. \quad (2.17)$$

Поскольку p_{b0} выбирается больше чем p_{b1} , то

$$\tau_{\text{del, syn}}^{(a)} < \tau_{\text{del}}^{(a)}. \quad (2.18)$$

Вероятность случайного увеличения скорости p_a в (2.14) выбирается падающей функцией скорости v_n :

$$p_a(v_n) = \begin{cases} p_{a1} & \text{if } v_n < v_p \\ p_{a2} & \text{if } v_n \geq v_p, \end{cases} \quad (2.19)$$

где v_p , p_{a1} , и $p_{a2} < p_{a1}$ являются постоянными. Это позволяет моделировать эффект, что автомашина, движущаяся в плотном потоке на небольшой скорости, стремится приблизиться к автомашине впереди. Действительно, согласно (2.1)–(2.2), (2.13), (2.14), если вероятность p_a велика, эффект адаптации скорости к скорости более медленной автомашины впереди достаточно слабый, поскольку с вероятностью p_a автомашина не уменьшает свою скорость, пока не достигнет минимального безопасного расстояния. Такая тенденция минимизировать дистанцию до автомашины впереди при низких скоростях приводит, в частности, к так называемому пинч-эффекту (“pinch effect”) в синхронизованном потоке с последующим спонтанным возникновением движущихся кластеров.

Тенденция минимизировать дистанцию до автомашины впереди при низких скоростях оказывается автоматически встроенной в КА модель, если нижняя граница L приближается к верхней границе U как на рис. 2.1(б), поскольку при этом расстояние синхронизации приближается к минимальному безопасному расстоянию при низких скоростях. В этом случае, зависимость (2.19) вероятности p_a от скорости уже не требуется для реалистичного моделирования, поэтому вероятность p_a в (2.19) выбирается постоянной в версии КА модели, отвечающей рис. 2.1 (б).

Случайные флуктуации скорости разрушают стационарные состояния синхронизованного потока: как и в реальности, в трехфазной КА модели после того как произошел $F \rightarrow S$ переход, возникают *динамические* пространственно-временные состояния синхронизованного потока [147, 175]. Однако, в некоторых случаях эти сложные динамические состояния могут оказаться близки к стационарным состояниям синхронизованного потока.

2.3. Трехфазная КА модель транспортного потока с ситуативным временем задержки водителя при ускорении

2.3.1. Правила движения

Как и в КА модели в § 2.2, в КА модели транспортного потока с ситуативным временем задержки водителя при ускорении используются дискретные и безразмерные координата x_n и скорость v_n , которые измеряются соответственно в единицах δx и $\delta v = \delta x/\tau$, время t_n измеряется в единицах τ . Интервалы дискретизации выбираются равными $\delta x = 1.5$ м и $\delta v = 1.5$ м/с, временной шаг τ равен 1 с. В формулах ниже величина τ равна единице и сохранена для наглядности.

По сравнению с КА моделью в § 2.2, в КА модели с ситуативным временем задержки водителя при ускорении вводятся несколько дополнительных правил движения, которые позволяют провести более реалистичное моделирование фронтов структур синхронизованного потока. Кроме того, в КА модели рассматривается два типа автомашин: легковые и грузовые. Представленная КА модель состоит из следующих последовательно применяемых правил движения:

- (а) “переускорение из-за смены полосы на более быструю”, смена полосы (в целях обгона) происходит с вероятностью p_c , когда выполнены условия для намерения сменить полосу (2.20)–(2.25) и условия для безопасной смены полосы (2.26):

$$R \rightarrow L : v_n^+ \geq v_{\ell,n} + \delta_1 \text{ and } v_n \geq v_{\ell,n}, \quad (2.20)$$

$$L \rightarrow R : v_n^+ \geq v_{\ell,n} + \delta_2 \text{ or } v_n^+ \geq v_n + \delta_2, \quad (2.21)$$

$$R \rightarrow L, : v_n^+ \geq v_{\ell,n} + \delta_1 \text{ and } v_n \geq v_{\ell,n} \quad (2.22)$$

$$\text{and } v_{\ell,n} < v_{\text{free, long}}^{(\max)} - \delta_0, \quad (2.23)$$

$$L \rightarrow R, : v_n^+ \geq v_{\ell,n} + \delta_2 \text{ or } v_n^+ \geq v_n + \delta_2 \quad (2.24)$$

$$\text{or } v_n^+ \geq v_{\text{free, long}}^{(\max)} - \delta_0, \quad (2.25)$$

$$g_n^+ \geq \min(v_n, g_c) \text{ and } g_n^- \geq \min(v_n^-, g_c), \quad (2.26)$$

(б) “сравнение расстояния до машины впереди с расстоянием синхронизации ”:

если $g_n \leq G(v_n)$, тогда выполняются
правила (в), (г), а правило (д) пропускается, (2.27)

если $g_n > G(v_n)$, тогда пропускаются
правила (в), (г), а правило (д) выполняется, (2.28)

(в) “адаптация скорости в пределах расстояния синхронизации ”:

$$v_{n+1} = v_n + \text{sgn}(v_{\ell,n} - v_n), \quad (2.29)$$

(г) “случайное переускорение в пределах расстояния синхронизации без смены полосы”

если $v_n \geq v_{\ell,n}$, тогда с вероятностью p_a ,
$$v_{n+1} = \min(v_{n+1} + 1, v_{\text{free}}), \quad (2.30)$$

(д) “ускорение”:

$$v_{n+1} = \min(v_n + 1, v_{\text{free}}), \quad (2.31)$$

(е) “торможение”, связанное с безопасной скоростью $v_{s,n} = g_n$:

$$v_{n+1} = \min(v_{n+1}, g_n), \quad (2.32)$$

(ж) “случайное торможение (рандомизация)”:

$$\text{с вероятностью } p, \quad v_{n+1} = \max(v_{n+1} - 1, 0), \quad (2.33)$$

(з) “перемещение автомашины за один шаг по времени”:

$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1}. \quad (2.34)$$

Правило (а) “переускорение из-за смены полосы на более быструю” применяется при условии

$$r_1 < p_c, \quad (2.35)$$

где $r_1 = \text{rand}()$ случайное число между 0 и 1 с равномерной функцией распределения. Правило (г) “случайное переускорение в пределах расстояния синхронизации без смены полосы” применяется при условии

$$r < p_a, \quad (2.36)$$

где $r = \text{rand}()$ случайное число между 0 и 1 с равномерной функцией распределения. Правило (ж) “случайное торможение (рандомизация)” применяется при условии

$$p_a \leq r < p_a + p, \quad (2.37)$$

где $p_a + p \leq 1$. Вероятность переускорения p_a в (2.30) выбирается возрастающей функцией скорости:

$$p_a(v_n) = p_{a,1} + p_{a,2} \max(0, \min(1, (v_n - v^{(\text{syn})})/\Delta v^{(\text{syn})})), \quad (2.38)$$

величины $p_{a,1}$, $p_{a,2}$, $v^{(\text{syn})}$ и $\Delta v^{(\text{syn})}$ являются постоянными (Таблица 2.1). Правило (в) описывает адаптацию (выравнивание) скорости к скорости машины впереди, когда расстояние до машины впереди не превышает расстояние синхронизации. Под переускорением в правилах (а) и (г) понимается избыточное ускорение, превышающее необходимое для адаптации скорости к скорости машины впереди в пределах расстояния синхронизации.

В формулах (2.20)–(2.34), $n = 0, 1, 2, \dots$ – номер временного шага; v_{free}

максимальная скорость на дороге для легковых автомобилей; $v_{\text{free, long}}^{(\text{max})}$ максимальная скорость для грузовиков; нижний индекс ℓ как и ранее обозначает переменные, относящиеся к машине впереди;

$$g_n = x_{\ell, n} - x_n - d_\ell \quad (2.39)$$

это расстояние до машины впереди; длина машины впереди d_ℓ зависит от того, легковая ли это машина или грузовая;

$$G(v_n) = kv_n \quad (2.40)$$

это расстояние синхронизации. Обозначения $R \rightarrow L$ и $L \rightarrow R$ означают соответственно смену полосы с правой на левую и, наоборот, с левой на правую для двухполосной дороги.

В условиях смены полосы (2.20)–(2.26), верхние индексы “+” и “−” обозначают переменные, относящиеся к едущим по соседней полосе ближайшим автомашинам впереди (“+”) и позади (“−”), между которыми водитель хочет въехать при смене полосы. В частности,

$$g_n^+ = x_n^+ - x_n - d^+ \quad (2.41)$$

это расстояние до ближайшей автомашины впереди, которая движется по соседней полосе и имеет координату x_n^+ и длину d^+ ;

$$g_n^- = x_n - x_n^- - d \quad (2.42)$$

это расстояние до ближайшей автомашины позади, которая движется по соседней полосе и имеет координату x_n^- и длину d^- .

Значения скорости v_n^+ или $v_{\ell, n}$ в неравенствах (2.20)–(2.25) заменяются на ∞ , если расстояние g_n^+ (2.41) или g_n (2.39) превышают заданную величину L_a (“look-ahead distance”). В (2.20)–(2.40), δ_1 , δ_2 , δ_0 , g_c являются параметрами модели (Таблица 2.1).

Основные свойства правил для смены полосы (2.20)–(2.21) взяты из работы Nagel и др. [234]. В частности, как видно из условия (2.21), в этих

правилах разрешен обгон по правой полосе. Кроме того, после обгона медленной автомашины по левой полосе водитель стремится вернуться на правую полосу, если на ней достаточно места, т.е., если расстояние до машины впереди на правой полосе g_n^+ превышает L_a . В этом случае v_n^+ в условии (2.21) заменяется на ∞ , и данное условие выполняется.

Вероятность p в (2.33), (2.37) задается формулой

$$p = \begin{cases} p_2 & \text{for } v_{n+1} > v_n \\ p_3 & \text{for } v_{n+1} \leq v_n. \end{cases} \quad (2.43)$$

Формула (2.43) позволяет рассматривать временную задержку при ускорении автомашины, в частности, на заднем по потоку фронте синхронизованного потока независимо от эффекта переторможения: временная задержка при ускорении автомашины зависит от вероятности p_2 , в то время как эффект переторможения зависит от вероятности p_3 . Кроме того, в рассматриваемой КА модели временная задержка при ускорении автомашины предполагается различной при ускорении автомашины на заднем фронте синхронизованного потока и на заднем фронте широкого движущегося кластера. Для этого вероятность p_2 задается формулой

$$p_2(v_n) = \begin{cases} p_0^{(2)} & \text{for } v_n = 0 \\ p_1^{(2)} & \text{for } v_n > 0. \end{cases} \quad (2.44)$$

В рассматриваемой КА модели транспортного потока с ситуативным временем задержки водителя при ускорении в формуле (2.44) вероятность $p_1^{(2)}$ выбирается так, чтобы обеспечить временную задержку при ускорении только если автомашина еще не ускорялась на предыдущем временном шаге n :

$$p_1^{(2)} = \begin{cases} p_2^{(2)} & \text{for } v_n \leq v_{n-1} \\ 0 & \text{for } v_n > v_{n-1}, \end{cases} \quad (2.45)$$

В (2.43)–(2.45), p_3 , $p_0^{(2)}$, и $p_2^{(2)}$ являются постоянными параметрами (Таблица 2.1).

Стационарные состояния КА модели с ситуативным временем задержки водителя при ускорении показаны на рис. 2.2 (а, б).

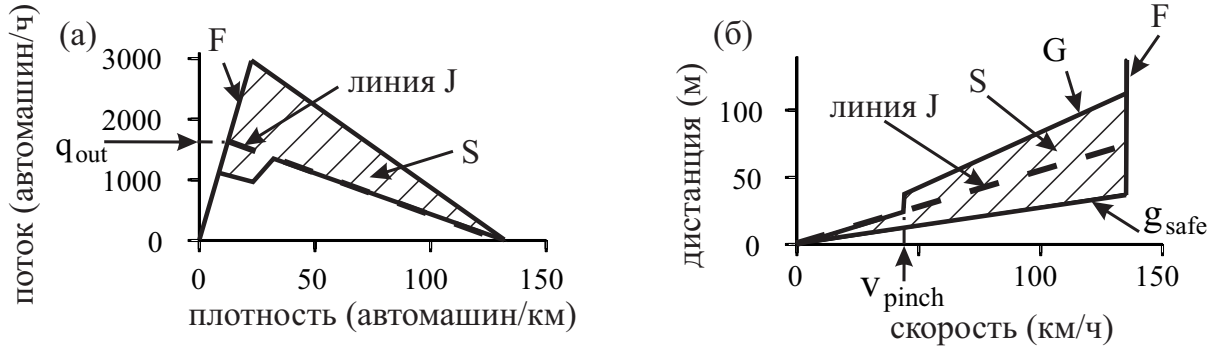


Рис. 2.2: Стационарные состояния КА модели с ситуативным временем задержки водителя при ускорении в плоскости поток–плотность (а) и в плоскости дистанция–скорость (б). F – свободный поток, S – синхронизованный потока (заштрихованная 2D-область на (а, б)); линия J представляет собой линию J Кернера, которая описывает задний по потоку фронт широкого движущегося кластера; q_{out} – это величина потока, относящаяся к свободному потоку после широкого движущегося кластера; G – это расстояние синхронизации; $g_{safe} = v$ минимальная безопасная дистанция между автомобилями, движущимися со скоростью v .

Чтобы описать пинч–эффект (“pinch effect”), приводящий к спонтанному возникновению широких движущихся кластеров в синхронизованном потоке (S→J переход) [123], предполагалось, что в формуле (2.40)

$$k(v_n) = \begin{cases} k_1 & \text{for } v_n > v_{pinch} \\ k_2 & \text{for } v_n \leq v_{pinch}, \end{cases} \quad (2.46)$$

где v_{pinch} , k_1 , и k_2 – константы ($k_1 > k_2 \geq 1$) (Таблица 2.1).

Модельный параметр v_{pinch} определяет диапазон скоростей в синхронизованном потоке, $0 < v \leq v_{pinch}$ (рис. 2.2 (б)), в пределах которого широкие движущиеся кластеры возникают спонтанно с большой вероятностью. Параметры КА модели с ситуативным временем задержки водителя при ускорении, часто используемые при моделировании, приведены в Таблице 2.1.

КА модель с ситуативным временем задержки водителя при ускорении использовалась для моделирования гетерогенного транспортного потока. В модели гетерогенного потока, правила движения КА модели такие же, как для случая одинаковых автомобилей, однако параметры, определяющие

индивидуальные характеристики автомашин, выбирались индивидуально для каждого типа автомашин. В частности, в гетерогенном потоке, состоящем из легковых и грузовых автомашин, длина автомашины впереди d_ℓ зависила от ее типа. В правилах смены полосы параметры выбирались следующим образом: $\delta_1 < \delta_2$ для легковых автомашин и $\delta_1 > \delta_2$ грузовиков. Если грузовая автомашина находилась на левой полосе и условие (2.25) было выполнено, автомашина уменьшала максимальную скорость до величины $v_{\text{free, L}}^{(\max)} < v_{\text{free, long}}^{(\max)}$ и переходила на правую полосу с вероятностью $p_c = 1$, когда выполнялось условие (2.26) безопасной смены полосы. Длина грузовиков выбиралась существенно больше, чем для легковых автомашин, а максимальная скорость $v_{\text{free}} = v_{\text{free, long}}^{(\max)}$, наоборот, существенно меньше.

2.3.2. Граничные и начальные условия

Для КА модели применялись открытые граничные условия. В начале дороги новые автомашины генерировались одна за одной на каждой полосе в моменты времени

$$n^{(m)} = \lceil m\tau_{\text{in}} \rceil, \quad m = 1, 2, \dots \quad (2.47)$$

В (2.47), $\tau_{\text{in}} = 1/q_{\text{in}}$, q_{in} – величина входного потока на одну полосу, скобки $\lceil z \rceil$ означают ближайшее целое, большее или равное z . Новая автомашина появлялась на автодороге, только если расстояние от начала автодороги до координаты $x = x_{\ell, n}$ ближайшей к началу автомашины было не меньше, чем минимальное безопасное расстояние $v_{\ell, n} + d_\ell$:

$$x_{\ell, n} - x_b \geq v_{\ell, n} + d_\ell, \quad (2.48)$$

где $n = n^{(m)}$. Иначе условие (2.48) проверялось в момент времени $(n + 1)$ следующий к $n^{(m)}$ (2.47), и т.д., пока условие (2.48) не выполнится. Тогда новая автомашина появлялась на автодороге. После этого номер m в (2.47) увеличивался на 1.

Скорость v_n и координата x_n новой автомашины устанавливались как

$$\begin{aligned} v_n &= v_{\ell,n}, \\ x_n &= \max(x_b, x_{\ell,n} - \lfloor v_n \tau_{in} \rfloor). \end{aligned} \quad (2.49)$$

Величина потока q_{in} при моделировании выбиралась таким образом, чтобы величина $v_{free} \tau_{in}$ была целая. В начальном состоянии ($n = 0$) все автомашины имели максимальную скорость и располагались на одинаковых расстояниях друг от друга $x_{\ell,n} - x_n = v_{free} \tau_{in}$.

После того как автомашина достигала конца автодороги, она удалялась. Перед этим, ближайшая к концу автодороги автомашина сохраняла свою скорость и полосу.

2.3.3. Характеристики поведения водителя, используемые в трехфазной КА модели

2.3.3.1. Эффект адаптации скорости

В КА модели в рамках теории трех фаз, эффект адаптации скорости имеет место в пределах некоторого диапазона расстояний между машинами, который определяется условиями

$$g_{safe,n} \leq g_n \leq G_n. \quad (2.50)$$

В соответствии с (2.27), водитель сравнивает дистанцию до автомашины впереди с расстоянием синхронизации. Если выполняется условие (2.50), то скорость автомашины определяется формулой (2.29). Другими словами, водитель адаптирует скорость автомашины к скорости автомашины впереди (обозначение “адаптация скорости” на рис. 2.3).

Если же выполняется условие (2.28), т.е. $g_n > G(v_n)$, то водитель ускоряется в соответствии с формулой (2.31) (обозначение “ускорение” на рис. 2.3).

При условии $g_n < g_{safe,n}$, водитель тормозит в соответствии с (2.32). Это торможение моделируется с помощью безопасной скорости $v_{s,n} = g_n / \tau$

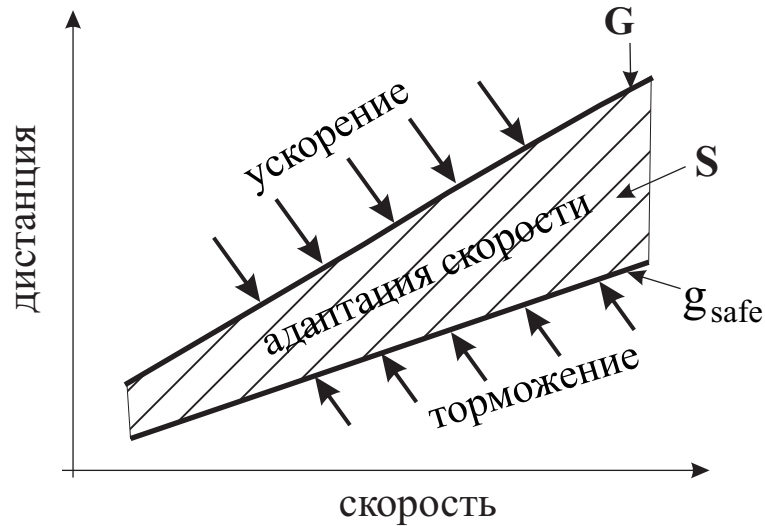


Рис. 2.3: Качественное объяснение движения за лидером (“car-following”) в КА модели в рамках теории трех фаз. Автомашина ускоряется при $g > G$ (обозначение “ускорение”) и тормозит при $g < g_{\text{safe}}$ (обозначение “торможение”), в то время как при условии (2.50) автомашина адаптирует свою скорость к скорости автомашины впереди, не заботясь о том, каким точно является расстояние до машины впереди (обозначение “адаптация скорости”). Заштрихованная область S показывает состояния синхронизованного потока.

(обозначение “торможение” на рис. 2.3).

2.3.3.2. Эффект переускорения

В КА модели, модельные флуктуации, которые моделируют переускорение при движении за лидером по одной полосе автодороги, формулируются следующим образом: каждая автомашина, которая движется за лидером в синхронизованном потоке на дистанции, которая удовлетворяет условию (2.50), получает дополнительное случайное ускорение в соответствии с (2.30) с вероятностью p_a ($0 < p_a < 1$). Это случайное ускорение происходит с вероятностью p_a , даже если автомашина впереди не ускоряется или же едет медленнее. Поэтому, в соответствии с определением переускорения, это случайное ускорение является примером переускорения. Поскольку вероятность $p_a < 1$, в среднем присутствует временная задержка в переускорении. Средняя временная задержка в переускорении превышает один временной шаг КА модели ($\tau = 1$ с).

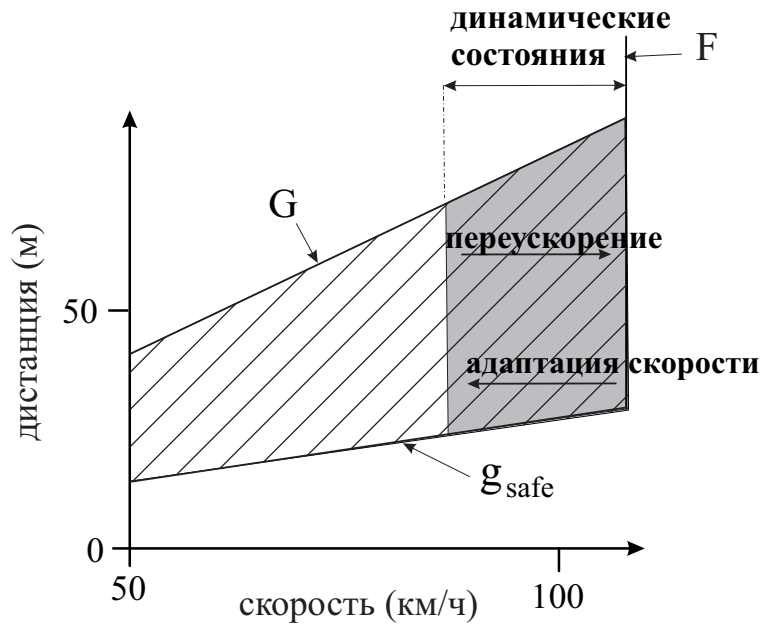


Рис. 2.4: Качественное объяснение “конкуренции” между эффектом переускорения и эффектом адаптации скорости в трехфазной КА модели. Часть области стационарных состояний синхронизованного потока относительно высокой скорости (заштрихованная область) и скорость в свободном потоке (F). Серым цветом качественно показаны динамические состояния, в которых синхронизованный поток разрушается и не возникает никаких долгоживущих состояний синхронизованного потока.

Вероятность переускорения p_a может быть выбрана как возрастающая функция скорости автомашины (формула (2.38)). Такая зависимость увеличивает эффект переускорения внутри локального возмущения, связанного с увеличением скорости в синхронизованном потоке, и тем самым соответствует предсказанию теории трех фаз, что чем сильнее переускорение, тем больше вероятным является $S \rightarrow F$ переход. В результате это приводит к разрывному характеру вероятности переускорения как функции плотности (и величины потока), как того требует гипотеза теории трех фаз (рис. 1.10).

В этом подходе к математическому моделированию разрывного характера переускорения возникают *динамические* состояния с повышенной скоростью (серая область, обозначенная как “динамические состояния” на рис. 2.4) между состояниями свободного потока (линия F) и состояниями синхронизованного потока с пониженной скоростью. В этих динамических состояниях, синхронизованный поток высокой скорости разрушается и не

возникает никаких долгоживущих состояния синхронизованного потока.

В динамических состояниях с повышенной скоростью имеет место “конкуренция” между эффектом переускорения и эффектом адаптации скорости в трехфазной КА модели (обозначенными “переускорение” и “адаптация скорости” на рис. 2.4), которое происходит внутри локального возмущения свободного потока вблизи узкого места. Это моделирует метастабильность перехода от свободного к синхронизованному потоку ($F \rightarrow S$ переход) на узком месте автодороги.

Следует отметить, что динамические состояния повышенной скорости между свободным потоком и синхронизованным потоком (рис. 2.4) вместе с разрывным характером переускорения могут быть также смоделированы в полностью детерминистической модели транспортного потока в рамках теории трех фаз. В частности, вероятно первой детерминистической трехфазной моделью, в которой была смоделирована метастабильность свободного потока относительно $F \rightarrow S$ перехода на узком месте автодороги, была микроскопическая детерминистическая ATD модель в рамках теории трех фаз [154]. В этой модели существуют нестационарные динамические состояния повышенной скорости между состояниями свободного потока и состояниями синхронизованного потока, а также переускорение с временной задержкой. Эти свойства модели позволяют смоделировать метастабильность перехода от свободного к синхронизованному потоку ($F \rightarrow S$ переход).

2.3.3.3. Математическое моделирование эффекта переускорения из-за смены полосы

На многополосной автодороге, даже если не учитывать эффект переускорения на одной полосе, обсужденный в § 2.3.3.2, разрывный характер переускорения (рис. 1.10) может быть смоделирован на основе поведения водителя при смене полосы.

Например, в КА модели транспортного потока на двухполосной автодороге эффект переускорения из-за смены полосы моделируется следующим образом [172]: смена полосы с целью обгона происходит с вероятностью p_c , когда выполнены условия для намерения сменить полосу (2.20)–(2.25) и

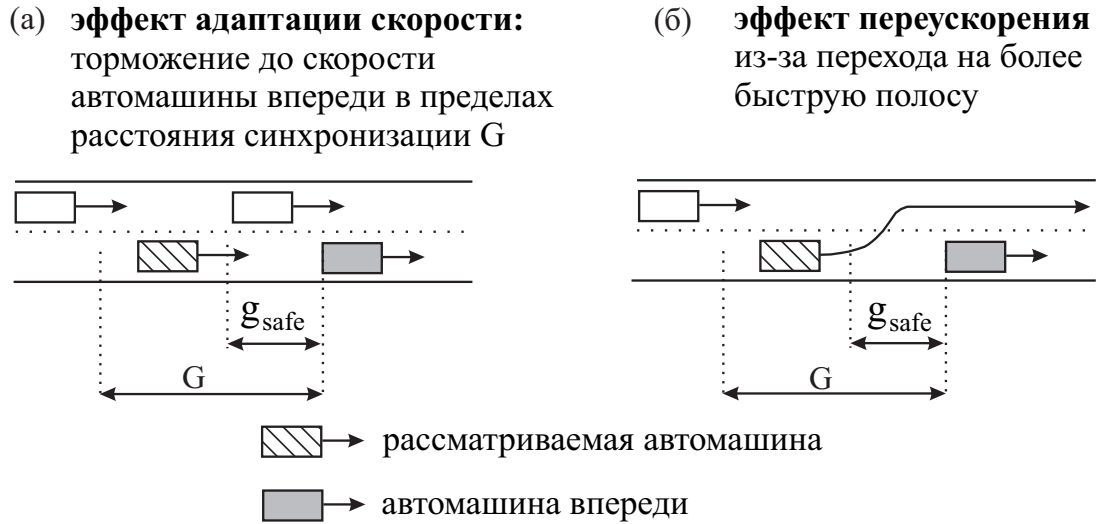


Рис. 2.5: Качественная иллюстрация торможения автомашины из-за эффекта адаптации скорости (а) и ускорения автомашины из-за эффекта переускорения для специального случая, когда переускорение связано *только* со сменой полосы (б).

условия для безопасной смены полосы (2.26).

Для объяснения качественно физики математического моделирования разрывного характера переускорения (рис. 1.10) из-за смены полосы на многополосной автодороге, рассмотрим сценарий, в котором автомашина движется в свободном потоке на многополосной автодороге и догоняет более медленную автомашину впереди. Если вначале автомашина не может обогнать автомашину впереди, тогда она тормозит в пределах расстояния синхронизации, т.е. реализуется эффект адаптации скорости, приводящий к движению за лидером (“car-following”) (рис. 2.5 (а)). Если в дальнейшем автомашина сможет обогнать эту более медленную автомашину впереди, то, чтобы совершить обгон, автомашина должна сменить полосу и ускориться. Это ускорение может иметь место, даже если автомашина впереди не ускоряется или же едет медленнее. Поэтому, такое ускорение при обгоне является примером переускорения.

В рассматриваемой случае, эффект переускорения включает только ускорение автомашины для обгона, т.е., переход на более быструю полосу (рис. 2.5 (б)). По этой причине, вероятность переускорения P_{OA} равна вероятности обгона на многополосной автодороге.

Однако, как показано в [167], для более реалистичного моделирования гетерогенного потока, состоящего из легковых и грузовых автомашин, необходимо учитывать эффект переускорения как за счет смены полосы, так и при движении за лидером без смены полосы (§ 2.3.3.2).

- Разрывный характер переускорения (рис. 1.10) может быть показан различными математическими моделями переускорения. В трехфазной КА модели, переускорение моделируется с помощью дополнительного случайного ускорения автомашины, находящейся в состоянии движения за лидером. Существует временная задержка для эффекта переускорения. Это приводит к разрывному характеру переускорения, даже если автомашины двигаются на однополосной дороге. На многополосной автодороге, переход на более быструю полосу дает дополнительный вклад в эффект переускорения.
- Для реалистичного моделирования гетерогенного потока на многополосной автодороге необходимо принимать во внимание эффект переускорения как за счет смены полосы, так и при движении за лидером без смены полосы.

2.3.4. Правила движения автомашин на узком месте автодороги в КА модели

2.3.4.1. Модели узкого места из-за въезда/съезда и из-за слияния полос

Модели узкого места из-за въезда на автодорогу, съезда с нее, а также из-за слияния двух полос в одну, показаны на рис. 2.6.

Узкое место из-за въезда на автодорогу состоит из двух частей (рис. 2.6 (a)):

- (i) Область въезда длины L_m , где автомашины могут въехать на основную дорогу с въездной полосы.

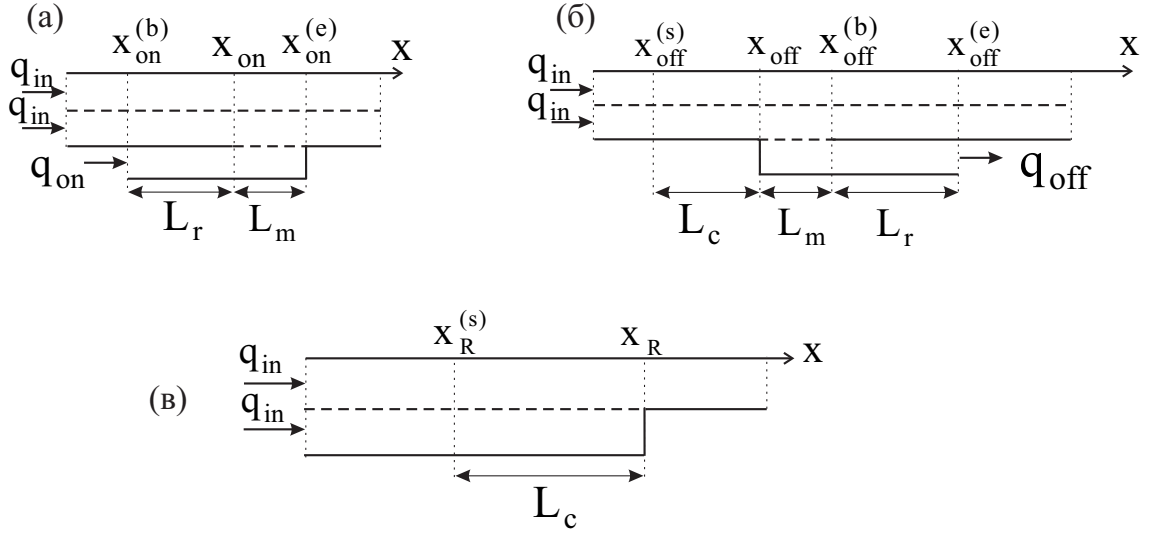


Рис. 2.6: Модели узкого места из-за въезда на автодорогу (а), съезда с нее (б), а также из-за слияния двух полос в одну (в).

- (ii) Часть въездной полосы длины L_r до области въезда, где автомашины двигаются по полосе в соответствии с правилами КА модели (2.27)–(2.34), (2.36)–(2.46) с максимальной скоростью $v_{\text{free}} = v_{\text{free on}}$.

В начале полосы въезда ($x = x_{\text{on}}^{(b)}$) величина потока во въезд q_{on} задается таким же образом, как и величина потока q_{in} на основной автодороге.

Узкое место из-за съезда с автодороги состоит из двух частей (рис. 2.6 (б)):

- (i) Область съезда длины L_m , где автомашины могут съехать с основной дороги на полосу съезда.
- (ii) Часть полосы съезда длины L_r после области съезда, где автомашины двигаются по полосе в соответствии с правилами КА модели (2.27)–(2.34), (2.36)–(2.46) с максимальной скоростью $v_{\text{free}} = v_{\text{free off}}$.

В пределах области длины $L_m + L_c$ на основной автодороге ($x_{\text{off}}^{(s)} \leq x \leq x_{\text{off}}^{(b)}$ на рис. 2.6 (б)), автомашины, едущие на съезд, должны перейти с левой полосы на правую на основной автодороге. Величина потока автомашин, едущих на съезд с автодороги, задается процентом η_{off} от величины потока q_{in} . С этой целью, в начале автодороги автомашина получает “атрибут”,

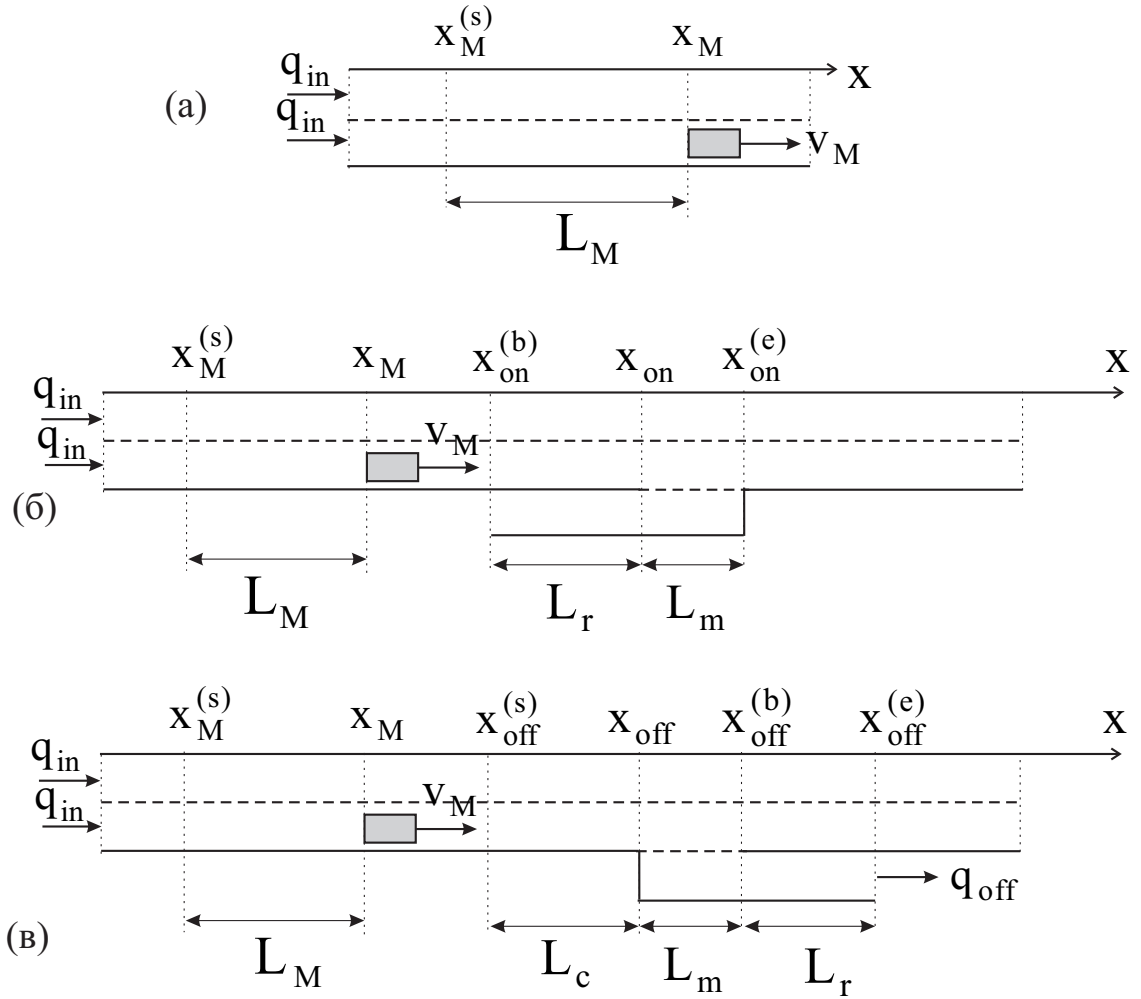


Рис. 2.7: Модель движущегося узкого места на двухполосной автодороге: Движущееся узкое место вдали от въездов/съездов (а), перед въездом (б), перед съездом (в).

который обозначает данную машину как едущую на съезд, если выполняется условие

$$r_{off} < \eta_{off}/100\% \quad (2.51)$$

где $r_{off} = \text{rand}(0, 1)$.

2.3.4.2. Модель движущегося узкого места

Будем рассматривать отдельную медленную автомашину, движущуюся в правой полосе с заметно меньшей скоростью v_M , где $v_M < v_{free}$, как движущееся узкое место на автодороге. Модель движущегося узкого места на

двухполосной автодороге показана на рис. 2.7(а) вдали от въездов/съездов, и на рис. 2.7(б, в) перед въездом и перед съездом соответственно.

Если медленную автомашину догоняет другая автомашина, движущаяся по правой полосе, то в пределах области длиной L_M (рис. 2.7) эта автомашина стремится перейти с правой полосы на левую для обгона.

2.3.5. Правила движения автомашин в области въезда, съезда и слияния полос

Для движения автомашин в области въезда, съезда, и слияния полос выбираются одинаковые правила:

(а) “условие въезда, съезда, и перехода на соседнюю полосу”:

$$g_n^+ \geq \min(\hat{v}_n, g_c^{(m)}) \quad \text{and} \quad g_n^- \geq \min(v_n^-, g_c^{(m)}), \quad (2.52)$$

где

$$\hat{v}_n = \min(v_n + 1, v_n^+), \quad (2.53)$$

(б) “сравнение с расстоянием синхронизации”:

$$\begin{aligned} &\text{если } g_n^+ \leq G(v_n), \text{ тогда выполняются} & (2.54) \\ &\text{правила (в), (г), а правило (д) пропускается,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{если } g_n^+ > G(v_n), \text{ тогда пропускаются} & (2.55) \\ &\text{правила (в), (г), а правило (д) выполняется,} \end{aligned}$$

(в) “адаптация скорости в пределах расстояния синхронизации”:

$$v_{n+1} = v_n + \text{sgn}(\hat{v}_n^+ - v_n), \quad (2.56)$$

(г) “случайное переускорение в пределах расстояния синхронизации без смены полосы”

$$\text{if если } v_n \geq \hat{v}_n^+, \text{ тогда с вероятностью } p_a, \\ v_{n+1} = \min(v_{n+1} + 1, v_{\text{free}}), \quad (2.57)$$

(д) “ускорение” дается формулой (2.31):

$$v_{n+1} = \min(v_n + 1, v_{\text{free}}), \quad (2.58)$$

(е) “торможение”, связанное с безопасной скоростью $v_{s,n}$:

$$v_{n+1} = \min(v_{n+1}, v_{s,n}), \quad (2.59)$$

(ж) “случайное торможение (рандомизация)” дается формулой (2.33):

$$\text{с вероятностью } p, \quad v_{n+1} = \max(v_{n+1} - 1, 0), \quad (2.60)$$

(з) “перемещение автомашины” дается формулой (2.34):

$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1}. \quad (2.61)$$

В (2.56), \hat{v}_n^+ задается как:

$$\hat{v}_n^+ = \max(0, \min(v_n^+ + \Delta v_r^{(2)}, v_{\text{free}})). \quad (2.62)$$

После изменения полосы, координата автомашины не меняется, а ее скорость устанавливается равной

$$v_n = \hat{v}_n. \quad (2.63)$$

Правило (г) “случайное переускорение в пределах расстояния синхро-

низации без смены полосы” (2.57) применяется при условии

$$r < p_a, \quad (2.64)$$

где $r = \text{rand}()$ случайное число между 0 и 1 с равномерной функцией распределения. Правило (ж) “случайное торможение (рандомизация)” (2.60) применяется при условии

$$p_a \leq r < p_a + p, \quad (2.65)$$

где $p_a + p \leq 1$.

В (2.52)–(2.62) используются следующие обозначение для параметров автомашин на соседней полосе до перехода на эту полосу: v_n^- скорость ближайшей автомашины позади на соседней полосе, v_n^+ скорость ближайшей автомашины впереди на соседней полосе, g_n^- (2.42) расстояние до ближайшей автомашины позади на соседней полосе, g_n^+ (2.41) расстояние до ближайшей автомашины впереди на соседней полосе. Величины p_a в (2.57), $G(v_n)$ в (2.54), (2.55), и p в (2.60) задаются формулами КА модели (2.38), (2.5), и (2.43), соответственно. $\Delta v_r^{(2)}$, $g_c^{(m)}$ – это константы (Таблица 2.2).

Безопасная скорость $v_{s,n}$ в правиле (е) “торможение” (2.59) для различных узких мест описывается следующими формулами. Для модели въезда:

$$v_{s,n} = \min(g_n, g_{on, n}), \quad (2.66)$$

где $g_{on, n} = x_{on} + L_m - x_n$ – расстояние от автомашины до конца области въезда. Для модели съезда:

$$v_{s,n} = \min(g_n, g_{off, n}), \quad (2.67)$$

где $g_{off, n} = x_{off} + L_m - x_n$ – расстояние от автомашины до конца области съезда. Для модели движущегося узкого места:

$$v_{s,n} = g_n. \quad (2.68)$$

Таблица 2.1: Параметры КА модели транспортного потока с ситуативным временем задержки водителя при ускорении, используемые при численном моделировании

Параметры для движения автомашины на одной полосе:
$\delta x = 1.5$ м, временной шаг 1 с, $d = 5$ (7.5 м) для легковых автомашин, $d = d^{(\text{truck})} = 12$ (18 м) для грузовиков, $v_{\text{free}} = 25$ (135 км/ч) для легковых автомашин, $v_{\text{free}} = v_{\text{free, long}}^{(\text{max})} = 16$ (86.4 км/ч) для грузовиков, $v_{\text{free, L}}^{(\text{max})} = 14$ (75.6 км/ч), $p_0^{(2)} = 0.5$ для легковых автомашин и $p_0^{(2)} = 0.7$ для грузовиков, $p_2^{(2)} = 0.35$, $p_3 = 0.01$, $p_{a,1} = 0.07$, $p_{a,2} = 0.08$, $v^{(\text{syn})} = 14$ (75.6 км/ч), $\Delta v^{(\text{syn})} = 3$ (16.2 км/ч), $v_{\text{pinch}} = 8$ (43.2 км/ч), $k_1 = 3$, $k_2 = 2$.
Параметры смены полосы:
$p_c = 0.07$, для легковых автомашин: $\delta_1 = 1$ (5.4 км/ч) и $\delta_2 = 3$ (16.2 км/ч); для грузовиков: $\delta_1 = 3$ (16.2 км/ч), $\delta_2 = 1$ (5.4 км/ч), $\delta_0 = 4$ (21.6 км/ч); $g_c = 16$ (24 м), $L_a = 100$ (150 м); если для грузовиков выполнено условие (2.25), то $p_c = 1$ и $g_c = 10$ (15 м).

В (2.66)–(2.68), расстояние g_n дается формулой (2.39).

Параметры модели, использованные при численной моделировании в диссертации, представлены в таблицах 2.1 и 2.2.

Таблица 2.2: Используемые при численном моделировании параметры моделей узкого места из-за въезда/съезда и движущегося узкого места для КА модели с ситуативным временем задержки водителя при ускорении

$g_c^{(m)} = 10$ (15 м) для моделей въезда, съезда и движущегося узкого места, $\Delta v_r^{(2)} = -1$ (-5.4 км/ч) для съезда $\Delta v_r^{(2)} = 5$ (27 км/ч) для въезда и движущегося узкого места, длина области въезда $L_m = 200$ (300 м), длина въездной полосы до области въезда $L_r = 200$ (300 м), длина области съезда $L_m = 400$ (600 м), длина области перехода на правую полосу до области съезда $L_c = 300$ (450 м), длина съездной полосы после области съезда $L_r = 600$ (900 м), длина области перехода на левую полосу перед движущимся узким местом $L_M = 300$ (450 м), максимальная скорость на полосе въезда до области въезда $v_{\text{free on}} = 17$ (91.8 км/ч), максимальная скорость на полосе съезда после области съезда $v_{\text{free off}} = 17$ (91.8 км/ч).

2.4. Разработка вероятностной модели перехода от свободного к плотному транспортному потоку

2.4.1. Теоретическая вероятность спонтанного перехода от свободного к плотному транспортному потоку

С помощью численного эксперимента на основе трехфазной КА модели § 2.2, была найдена теоретическая вероятность спонтанного перехода от свободного к плотному транспортному потоку [175]. Было найдено, что зависимость вероятности спонтанного перехода от свободного к плотному транспортному потоку от величины потока хорошо аппроксимируется функцией [175] (штриховая линия на рис. 2.8):

$$P^{(B)}(q_{\text{sum}}) = \frac{1}{1 + \exp[\beta(q_P - q_{\text{sum}})]}, \quad (2.69)$$

где q_{sum} – это величина потока на узком месте автодороги, β и q_P – параметры.

Растущий характер эмпирической зависимости вероятности перехода к плотному транспортному потоку на узком месте автодороги от величины потока, открытый Persaud и др. [260] и далее изученный Logenz и Elefteriadou [211], а также Brilon и др. [27–29], был также подтвержден в более поздних эмпирических исследованиях перехода к плотному потоку на узких местах из-за въездов и съездов с помощью одномоментных данных детекторов на автомагистралях в Германии (черные точки на рис. 2.9) [177]. Эмпирическая вероятность перехода к плотному транспортному потоку хорошо аппроксимируется теоретической зависимостью (2.69) вероятности перехода от величины потока (штриховые линии на рис. 2.9).

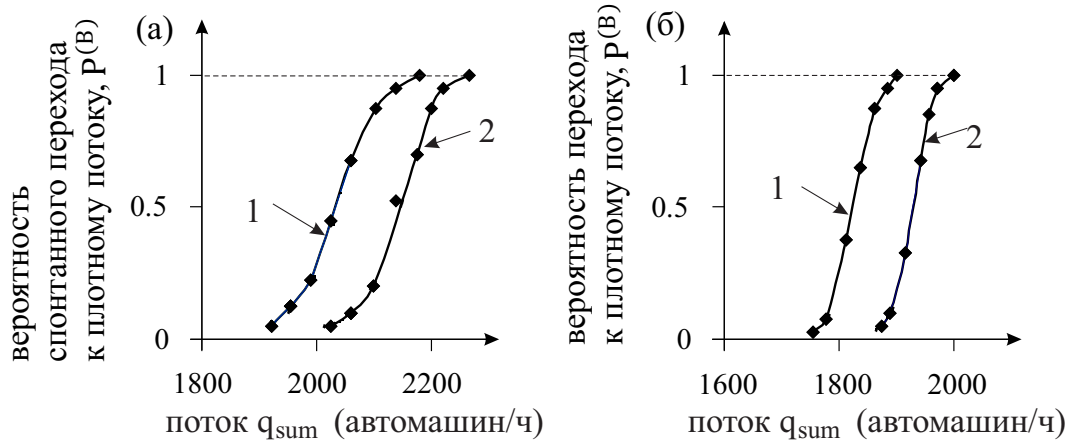


Рис. 2.8: Рассчитанная зависимость (от величины потока) вероятности спонтанного перехода от свободного к плотному транспортному потоку на узком месте из-за въезда на однополосную автодорогу на основе трехфазной КА модели [175]: (а) – величина потока автомашин через въезд $q_{on} = 60$ автомашин/ч; (б) – величина потока автомашин через въезд $q_{on} = 200$ автомашин/ч. Кривые 1 и 2 в (а, б) относятся соответственно к двум различным временам наблюдения $T_{ob} = 30$ (кривые 1) и 15 мин (кривые 2). $q_{sum} = q_{in} + q_{on}$.

2.4.2. Зависящие от потока характеристики спонтанного перехода от свободного к плотному транспортному потоку

В теории трех фаз Кернера (Глава 1), которая является качественной теорией, предполагается, что метастабильность свободного потока относительно $F \rightarrow S$ перехода реализуется в пределах определенного диапазона потоков

$$C_{min} \leq q_{sum} < C_{max}, \quad (2.70)$$

где q_{sum} – это величина свободного потока на узком месте, C_{min} и C_{max} соответственно минимальная и максимальная пропускная способность. При условии (2.70), переход к плотному потоку может быть индуцирован на узком месте.

Численные эксперименты, сделанные с помощью трехфазной КА модели и представленные в этой главе, показывают, что при условии (2.70) свободный поток находится в метастабильном состоянии относительно $F \rightarrow S$

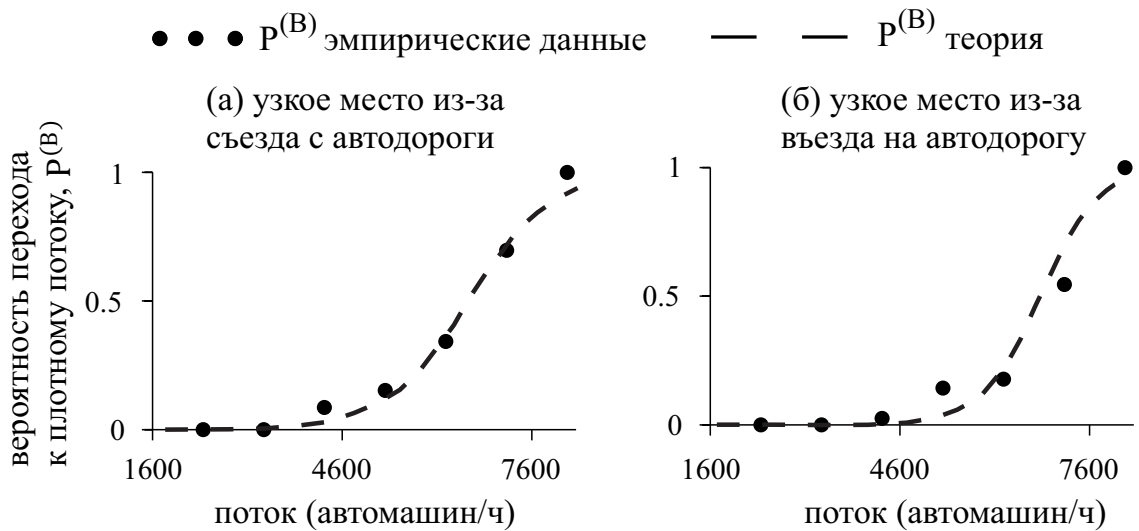


Рис. 2.9: Эмпирическая зависимость (от величины потока) вероятности перехода от свободного к плотному транспортному потоку $P^{(B)}$, измеренная на узком месте из-за съезда (а) и въезда (б). Эмпирическая вероятность перехода к плотному транспортному потоку (черные точки на (а)) была найдена из данных измерений, в которых переход к плотному транспортному потоку вблизи съезда наблюдался для 89 дней. Эмпирическая вероятность перехода к плотному транспортному потоку вблизи въезда (черные точки на (б)) была найдена из данных измерений, в которых переход к плотному транспортному потоку наблюдался для 56 дней. Эти эмпирические вероятности получены на основе реальных данных, измеренных дорожными детекторами, установленными на участке автомагистрали А5-Юг в Германии. Штриховые кривые относятся к теоретической вероятности перехода к плотному транспортному потоку $P^{(B)}$, задаваемой формулой (2.69) из § 1.5. Взято из [177].

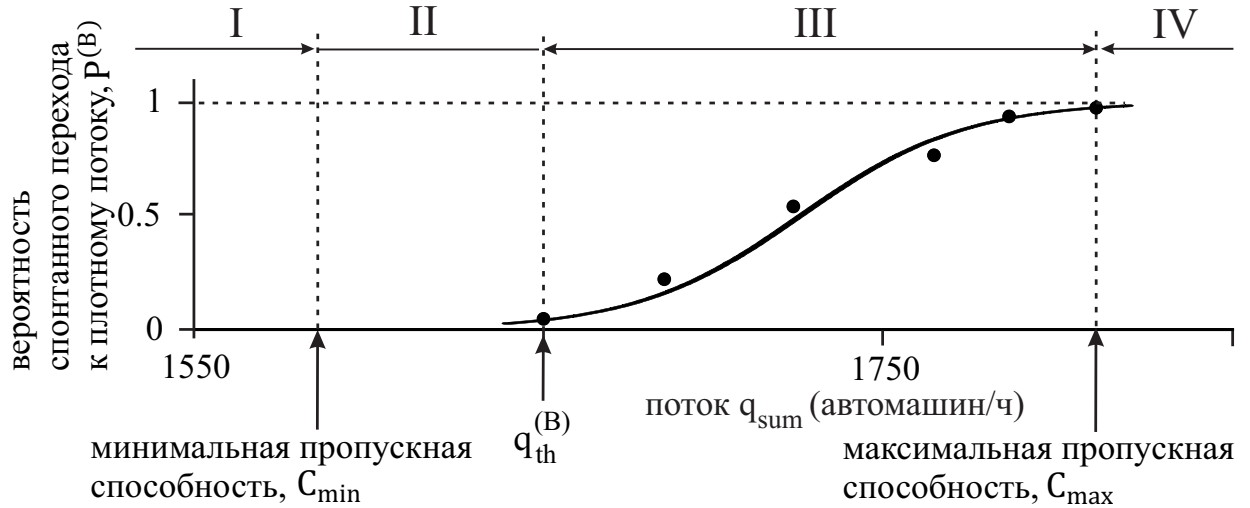


Рис. 2.10: Численное моделирование вероятности спонтанного перехода от свободного к плотному транспортному потоку $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$ сделанное на основе трехфазной КА модели § 2.3. Различные значения потока q_{sum} связаны с различными значениями величины потока q_{in} при заданном значении потока $q_{\text{on}} = 400$ автомашин/ч. $T_{\text{об}} = 30$ мин. Число реализаций при вычислении вероятности перехода $N_r = 40$. Функция $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$ хорошо аппроксимируется формулой (2.69).

перехода на узком месте. На основе численного моделирования транспортного потока в рамках теории трех фаз также установлено, что в этом метастабильном свободном потоке существуют по крайней мере два различных диапазона потоков, в которых переход к плотному потоку на узком месте автодороги показывает различные свойства (рис. 2.10). Согласно результатам численных расчетов, в целом можно выделить четыре диапазона I–IV потоков q_{sum} на узком месте, в которых найдены качественно различные вероятностные характеристики перехода к плотному потоку (рис. 2.10).

Целью этого параграфа 2.4.2 является объяснение значения и свойств этих четырех диапазонов I–IV потоков q_{sum} на узком месте автодороги.

2.4.2.1. Диапазон потоков I

При условии

$$q_{\text{sum}} < C_{\text{min}}, \quad (2.71)$$

не существует состояний транспортного потока, относящихся к синхронизованной фазе. Поэтому невозможен переход от свободного плотному потоку на узком месте, который, как указывалось выше, является $F \rightarrow S$ переходом. Это не зависит от амплитуды локального возмущения транспортного потока вблизи узкого места, т.е. не существует зародыша для $F \rightarrow S$ перехода. Таким образом, при условии (2.71) свободный транспортный поток *устойчив* относительно $F \rightarrow S$ перехода.

2.4.2.2. Диапазон потоков II

Когда величина потока q_{sum} превышает минимальную пропускную способность C_{min} , но близка к величине C_{min} , может выполняться условие

$$C_{\text{min}} \leq q_{\text{sum}} < q_{\text{th}}^{(B)} \quad (2.72)$$

В (2.72) $q_{\text{sum}} = q_{\text{th}}^{(B)}$ – это некоторая пороговая величина потока q_{sum} для спонтанного перехода к плотному потоку на узком месте. При условии (2.72) вероятность спонтанного перехода к плотному потоку на узком месте в течении времени наблюдения T_{ob} равна нулю:

$$P^{(B)}(q_{\text{sum}}) = 0. \quad (2.73)$$

Однако, при условии (2.72) свободный поток находится в метастабильном состоянии относительно перехода к плотному потоку ($F \rightarrow S$ переход). Поскольку в соответствии с (2.73) не происходит спонтанный переход к плотному потоку в течении времени наблюдения T_{ob} , то только индуцированный переход к плотному потоку возможен в метастабильном свободном потоке на узком месте при условии (2.72).

Из условия (2.72) для метастабильности свободного потока следует, что величина потока

$$q_{\text{sum}} = C_{\text{min}} \quad (2.74)$$

может рассматриваться как пороговая величина потока для *индуцированного* $F \rightarrow S$ перехода вблизи узкого места.

Минимальная пропускная способность C_{min} является *минимальный по-*

током q_{sum} на узком месте, при котором переход к плотному потоку ($F \rightarrow S$ переход) еще может быть индуцирован. Действительно, при условии $q_{\text{sum}} < C_{\text{min}}$ (2.71) свободный поток устойчив относительно $F \rightarrow S$ перехода: при $q_{\text{sum}} < C_{\text{min}}$ переход к плотному потоку невозможно индуцировать.

2.4.2.3. Диапазон потоков III

Если поток q_{sum} возрастает, то вместо условий (2.72), выполняется следующее условие

$$q_{\text{th}}^{(B)} \leq q_{\text{sum}} < C_{\text{max}}. \quad (2.75)$$

Увеличение потока q_{sum} в метастабильном свободном потоке приводит к увеличению амплитуды $\Delta v_{\text{cr, FS}}^{(B)}(q_{\text{sum}})$ критического возмущения, приводящего к переходу к плотному потоку (рис. 2.10). В диапазоне (2.75) вероятность спонтанного перехода к плотному потоку на узком месте в течении времени наблюдения $T_{\text{об}}$ удовлетворяет условию

$$0 < P^{(B)}(q_{\text{sum}}) < 1. \quad (2.76)$$

Это означает, что переход к плотному потоку может спонтанно произойти в течении времени наблюдения $T_{\text{об}}$. Кроме того, поскольку при условии (2.76) свободный поток находится в метастабильном состоянии относительно перехода к плотному потоку, в диапазоне потоков (2.75) переход к плотному потоку может быть индуцирован. Таким образом, в диапазоне потоков III (2.75), возможен как спонтанный, так и индуцированный переход к плотному потоку.

Численное моделирование перехода от свободного к плотному транспортному потоку на основе трехфазной КА модели показывает, что при увеличении времени наблюдения $T_{\text{об}}$, разница $q_{\text{th}}^{(B)} - C_{\text{min}}$ уменьшается. В этом случае, соответственно увеличивается ширина диапазона III и уменьшается ширина диапазона II. Физический смысл этого результата следующий. При заданной величине потока q_{sum} , чем больше время $T_{\text{об}}$, тем больше вероятность $P_{\text{nucleus}}^{(B)}$, что вблизи узкого места появится случайным образом локальное возмущение, приводящее к переходу к плотному потоку.

В результате, в соответствии с основным предположением теории трех фаз Кернера (1.1), вероятность $P^{(B)}$ перехода к плотному потоку растет, когда увеличивается время наблюдения $T_{\text{об}}$. Таким образом, увеличение времени $T_{\text{об}}$ вызывает уменьшение пороговой величины потока $q_{\text{th}}^{(B)}$ и соответствующий сдвиг границы между диапазонами потоков III и II в левую сторону на рис. 2.10.

2.4.2.4. Диапазон потоков IV

В диапазоне потоков

$$q_{\text{sum}} \geq C_{\text{max}}, \quad (2.77)$$

вероятность спонтанного возникновения локального возмущения, приводящего к $F \rightarrow S$ переходу в течении времени наблюдения $T_{\text{об}}$, удовлетворяет условию $P_{\text{nucleus}}^{(B)}(q_{\text{sum}}) = 1$. Это означает, что вероятность спонтанного перехода к плотному потоку на узком месте в течении времени наблюдения $T_{\text{об}}$ равна

$$P^{(B)}(q_{\text{sum}}) = 1. \quad (2.78)$$

2.4.3. Временная задержка перехода от свободного к плотному транспортному потоку на узком месте и расчет вероятности перехода

В соответствии с основным предположением теории трех фаз Кернера (1.1), когда локальное возмущение с амплитудой, достаточной для $F \rightarrow S$ перехода, спонтанно возникает вблизи узкого места на автодороге, спонтанный переход от свободного к плотному транспортному потоку действительно происходит на этом узком месте. Однако, возникновение такого локального возмущения в свободном потоке является случайным событием. Это означает, что существует случайная временная задержка в возникновении такого локального возмущения. Эта временная задержка обозначается как $T^{(B)}$. Таким образом, спонтанный переход к плотному транспортному потоку является фазовым переходом от свободного к синхронизованному потоку со случайной временной задержкой.

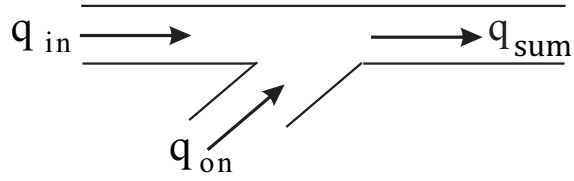


Рис. 2.11: Схематичный вид узкого места из-за въезда на однополосную автодорогу.

Для нахождения временной задержки проводилось численное моделирование перехода к плотному потоку в транспортном потоке из одинаковых автомашин с одинаковыми водителями на однополосной автодороге с узким местом из-за въезда на автодорогу. Поток q_{in} по основной дороге и поток q_{on} во въезд (рис. 2.11) предполагались постоянными. Суммарный поток $q_{sum} = q_{on} + q_{in}$ удовлетворял условию (2.75). При этом условии, в течении заданного достаточно большого времени наблюдения T_{ob} , переход к плотному потоку на узком месте происходил спонтанным образом с вероятностью, удовлетворяющей условию (2.76), или же такой переход мог быть индуцирован.

Временная задержка $T^{(B)}$ перехода к плотному потоку равна временному интервалу от начала вычислений при $t = 0$ до момента спонтанного перехода к плотному потоку на узком месте (временная задержка $T^{(B)}$ на рис. 2.12 (а)).

Вычисления повторялись при постоянных значениях потоков q_{on} и q_{in} и неизменных параметрах модели. Для получения разных реализаций транспортного потока, рассматриваемого как случайный процесс, изменялось случайным образом начальное условие для случайных флуктуаций модели, задаваемых функцией $rand()$: начальные значения в момент времени $t = 0$ для функции $rand()$ были различными для разных реализаций.

Изменение начальных условий для функции $rand()$, которая определяла случайные флуктуации модели, приводило к другой реализации случайного процесса, в котором было другая временная задержка $T^{(B)}$ перехода к плотному потоку (временная задержка $T^{(B)}$ на рис. 2.12 (б)).

В результате вычисления большого числа реализаций было найдено,

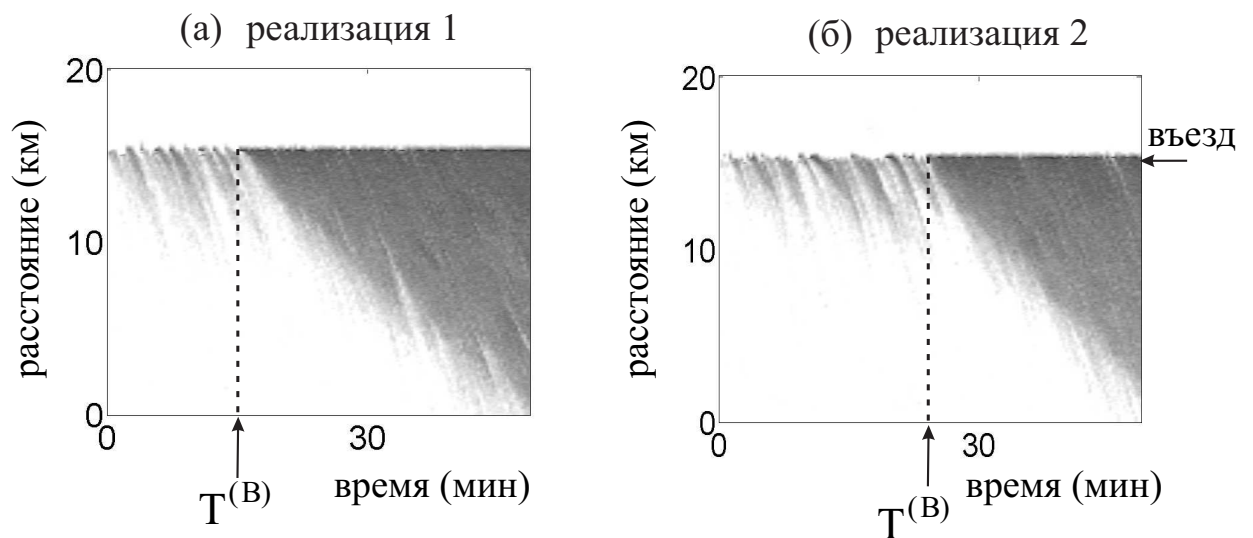


Рис. 2.12: Численное моделирование случайной временной задержки перехода от свободного к плотному транспортному потоку на узком месте из-за въезда на однополосной автодороге с помощью КА модели: (а, б) – скорость потока, показанная серым цветом переменной степени (степень серого цвета меняется от белого до черного, когда скорость уменьшается от 120 км/ч (белый) до 0 км/ч (черный)). Две различные реализации 1 (а) и 2 (б) относятся к одним и тем же заданным величинам потоков q_{on} , q_{in} . $T_{об} = 45$ мин.

что временная задержка $T^{(B)}$ перехода к плотному потоку на узком месте действительно является случайной величиной.

Различные реализации также использовались для вычисления вероятности перехода к плотному потоку на узком месте $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$ в зависимости от величины потока q_{sum} (рис. 2.10). Для заданной величины потока q_{sum} вероятность перехода $P^{(B)}$ рассчитывалась по формуле

$$P^{(B)} = \frac{n_r}{N_r}. \quad (2.79)$$

В (2.79), N_r (где $N_r \gg 1$) – полное это число случайных реализаций, n_r – число реализаций, в которых произошел переход к плотному потоку в течении заданного времени наблюдения $T_{\text{об}}$. На основе формулы (2.79), вычисления вероятности перехода к плотному потоку на узком месте $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$ проводились для каждого значения потока q_{sum} . Это позволило найти вероятность перехода $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$ как функцию величины потока q_{sum} (рис. 2.10). При этом, поскольку $q_{\text{sum}} = q_{\text{он}} + q_{\text{ин}}$, при вычислении вероятности $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$ либо поток $q_{\text{ин}}$, либо поток $q_{\text{он}}$, оставался постоянным.

Как рассматривалось в § 2.4.2, существуют четыре диапазона I–IV потоков q_{sum} , в которых имеют место различные условия для перехода к плотному потоку. На рис. 2.12 поток q_{sum} удовлетворяет условию (2.75) диапазона потоков III. Для диапазона потоков III, вероятность перехода к плотному потоку $P^{(B)}$ меньше 1 (рис. 2.10). В соответствии с формулой (2.79), действительно было найдено, что в некоторых реализациях происходит переход к плотному потоку (реализации 1 и 2 на рис. 2.12 (а, б)), в то время как в других реализациях *никакого* перехода к плотному потоку не происходит в течении всего времени наблюдения $T_{\text{об}}$ (реализация 3 на рис. 2.13 (а)).

В соответствии с выводами вероятностной теории перехода от свободного к плотному потоку в § 2.4.2, для диапазона III потоков q_{sum} , переход к плотному потоку может быть индуцирован, если спонтанный переход не происходит в в течении времени наблюдения $T_{\text{об}}$. Этот вывод подтверждается результатами численного моделирования, показанными на рис. 2.13 (б). В этом расчете переход к плотному потоку индуцируется с помощью

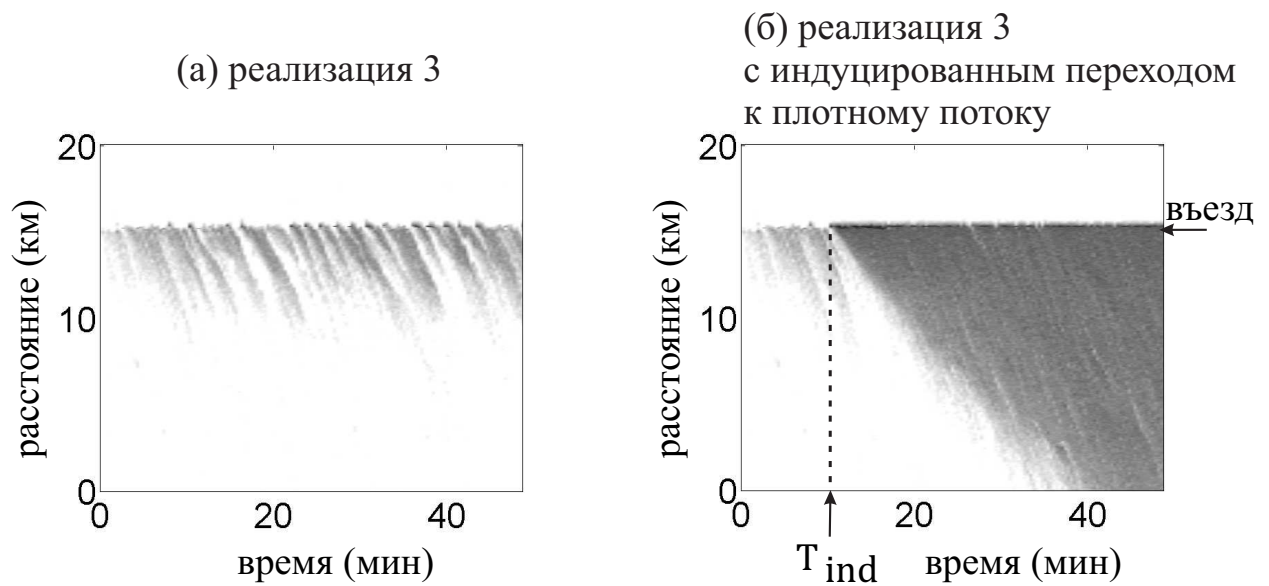


Рис. 2.13: Продолжение численного моделирования перехода от свободного к плотному транспортному потоку на узком месте из-за въезда на рис. 2.12. Численное моделирование индуцированного перехода от свободного к плотному транспортному потоку: (а, б) – скорость потока, показанная серым цветом переменной степени (степень серого цвета меняется от белого до черного, когда скорость уменьшается от 120 км/ч (белый) до 0 км/ч (черный)). На (а) показана одна из рассчитанных реализаций (реализация 3) для тех же значений потоков q_{on} и q_{in} , что и на рис. 2.12. Однако, в отличие от реализаций 1 и 2 на рис. 2.12, в реализации 3 не происходит переход к плотному потоку в течении всего времени наблюдения $T_{об} = 45$ мин. Для условий реализации 3, переход к плотному потоку индуцируется на рис.(б).

кратковременного увеличения величины потока во въезд q_{on} , произведенного в момент времени T_{ind} (рис. 2.13 (б)).

В результате численного моделирования на основе трехфазной КА модели можно сделать следующий вывод:

- Спонтанный переход от свободного к плотному транспортному потоку является фазовым переходом от свободного потока (F) к синхронизованному потоку (S), происходящим со случайной временной задержкой (F→S переход со случайной временной задержкой).

Все версии трехфазной КА модели, разработанные в диссертации [167, 172, 175], показывают переход от свободного к плотному транспортному потоку как фазовый переход от свободного потока (F) к синхронизованному потоку (S), происходящий со случайной временной задержкой. Примеры численного моделирования спонтанного и индуцированного перехода к плотному транспортному потоку на основа КА модели [172] представлены на рис. 2.14.

Результаты численного моделирования на основе трехфазной КА модели показывают, что КА модель позволяет описать фундаментальные свойства перехода от свободного к плотному транспортному потоку и пропускной способности, которые наблюдаются в эмпирических данных (§ 1.4). В частности, как и в эмпирических данных, в случае двух соседних узких мест на автодороге область синхронизованного потока (SP), которая первоначально возникает на узком месте, расположенном дальше по течению (обозначенном как “въезд 1” на рис. 2.14 (в, г)), затем распространяется вверх по течению и индуцирует другую структуру синхронизованного потока на узком месте, расположенном ближе по течению (обозначенном как “въезд 2” на рис. 2.14 (в, г)).

Результаты численного моделирования Z-характеристики для перехода от свободного к плотному транспортному потоку (F→S переход) представлены на рис. 2.15 (а, б) для транспортного потока, состоящего только из одинаковых легковых автомашин, на рис. 2.15 (в, г) для гетерогенного транспортного потока, состоящего из одинаковых легковых автомашин и 20% грузовиков. Как уже упоминалось, переход к плотному потоку это

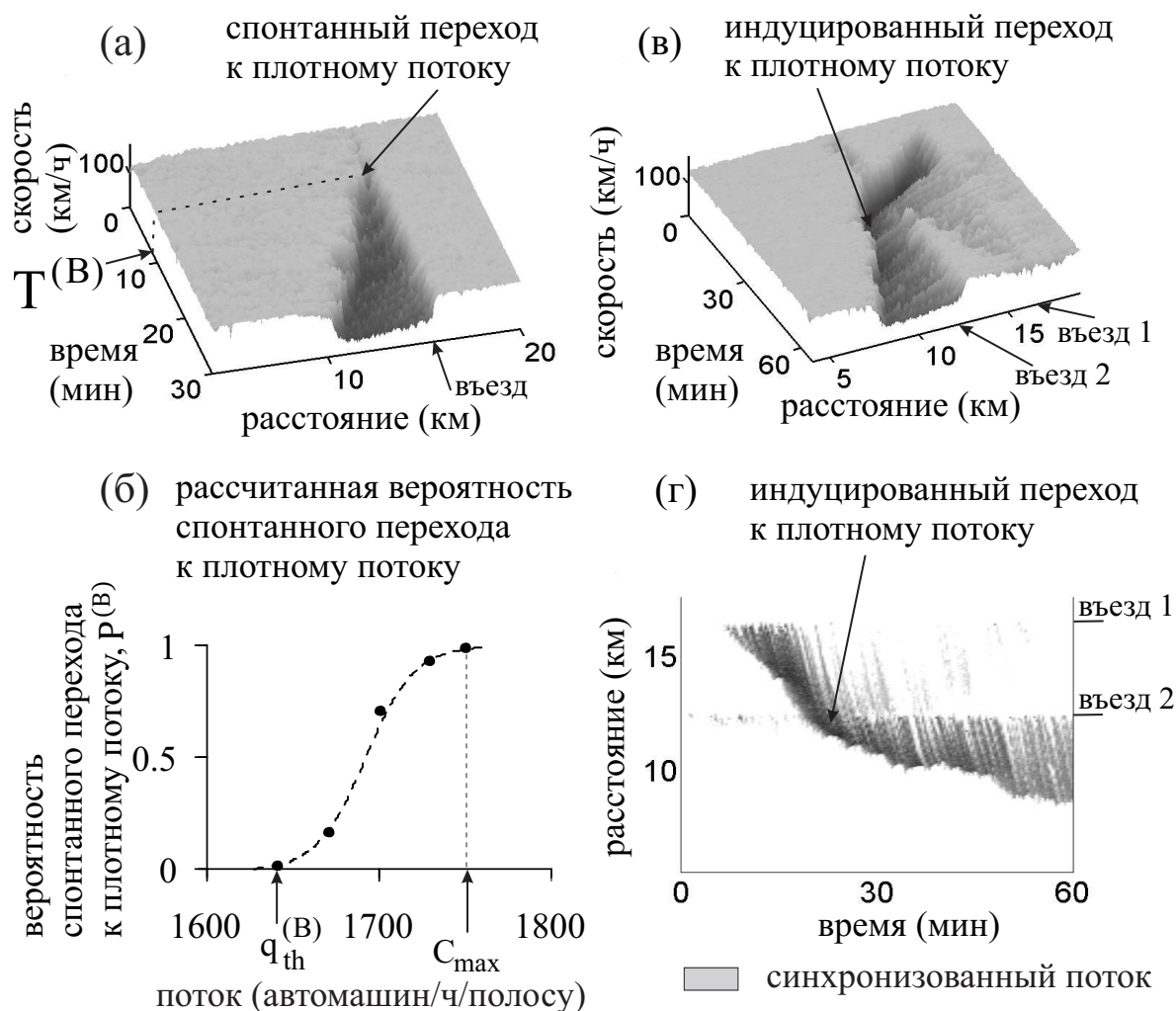


Рис. 2.14: Численное моделирование наблюдаемых эмпирически свойств перехода от свободного к плотному транспортному потоку с помощью трехфазной КА модели на двухполосной автодороге с узким местом из-за въезда на автодорогу [172]: (а) – спонтанный переход к плотному потоку на узком месте из-за въезда, временная задержка перехода $T_{FS}^{(B)} = 9$ мин, поток по основной дороге $q_{in} = 1450$ автомашин/ч на полосу, поток во въезд $q_{on} = 600$ автомашин/ч; (б) – вероятность спонтанного перехода к плотному потоку на узком месте $P^{(B)}$ как функция потока после узкого места $q_{sum} = q_{in} + 0.5q_{on}$ при заданной величине потока по основной дороге $q_{in} = 1450$ автомашин/ч на полосу и различных значениях потока во въезд q_{on} , аппроксимация функции $P^{(B)}(q_{sum})$ описывается формулой (2.69), координата въезда $x_{on} = 15$ км; (в, г) – индуцированный переход к плотному потоку: (в) скорость потока в пространстве и времени, (г) представление результатов моделирования (в) в плоскости координата–время.

фазовый $F \rightarrow S$ переход в метастабильном состоянии свободного потока. По этой причине, переход к плотному потоку характеризуется Z-образной зависимостью скорости от величины потока как для транспортного потока из одинаковых машин (рис. 2.15 (а)), так и для гетерогенного транспортного потока (рис. 2.15 (в)). В обоих случаях, вероятность перехода к плотному потоку является растущей функцией величины потока (рис. 2.15 (б, г)).

2.5. Возникновение движущихся кластеров в синхронизованном потоке

В соответствии с теорией трех фаз Кернера, в трехфазных моделях, разработанных в диссертации [167, 172, 175], движущиеся кластеры возникают спонтанно только в синхронизованном потоке ($S \rightarrow J$ переход). Соответствующие примеры показаны на рис. 2.16 для однополосной автодороги и на рис. 2.17 для автодороги с двумя полосами.

Можно видеть, что сначала фазовый переход от свободного к синхронизованному потоку ($F \rightarrow S$ переход) происходит спонтанно на узком месте из-за въезда на автодорогу. В результате синхронизованный поток появляется на узком месте, и затем распространяется против потока. В этом синхронизованном потоке на некотором расстоянии от узкого места спонтанно возникают движущиеся кластеры. Эти кластеры растут по амплитуде и ширине. В результате формируются широкие движущиеся кластеры ($S \rightarrow J$ переход).

2.6. Сравнение КА модели в рамках теории трех фаз с Nagel-Schreckenberg КА моделью

Чтобы показать качественное различие между трехфазными КА моделями, разработанными в диссертации, и классической Nagel-Schreckenberg (NaSch) КА моделью [16, 232], используется следующая методология. В КА

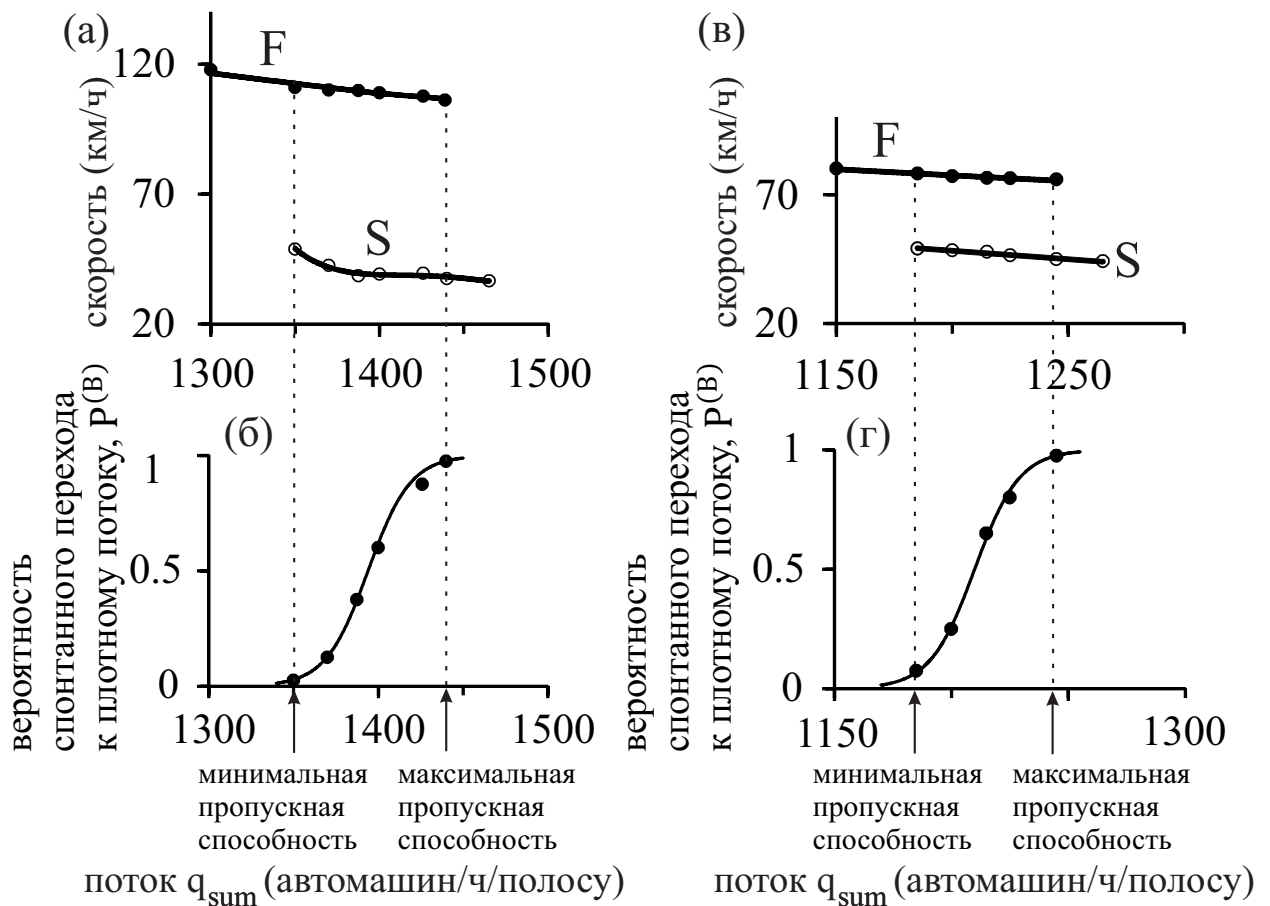


Рис. 2.15: Z-образная зависимость скорости от величины потока q_{sum} (а, в) и вероятность перехода к плотному потоку (б, г) на двухполосной дороге для транспортного потока, состоящего только из одинаковых легковых автомобилей (а, б), и для гетерогенного транспортного потока, состоящего из одинаковых легковых автомобилей и 20% грузовиков (в, г). Величина потока $q_{sum} = q_{in} + 0.5q_{on}$ в свободном потоке после узкого места изменялась за счет изменения потока q_{on} при заданной величине $q_{in} = 1125$ автомобилей/ч на 1 полосу. Состояния синхронизованного потока, показанные кривой S, получены путем усреднения 2D-области состояний внутри синхронизованного потока, возникшего на узком месте после F→S перехода.

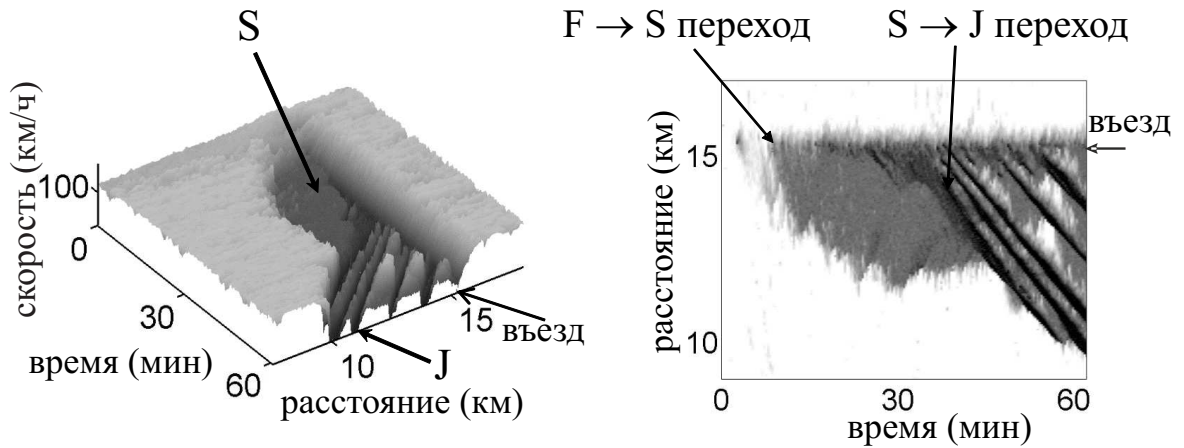


Рис. 2.16: Численное моделирование $S \rightarrow J$ перехода на однополосной автодороге на основе трехфазной КА модели в § 2.3, в результате которого происходит формирование общей структуры, состоящей из всех трех фаз (свободного потока, синхронизованного потока, и широких движущихся кластеров). Рисунок слева показывает скорость потока в пространстве и времени. Рисунок справа относится к тем же самым результатам расчета, показанным серым цветом переменной степени в плоскости координата–время.

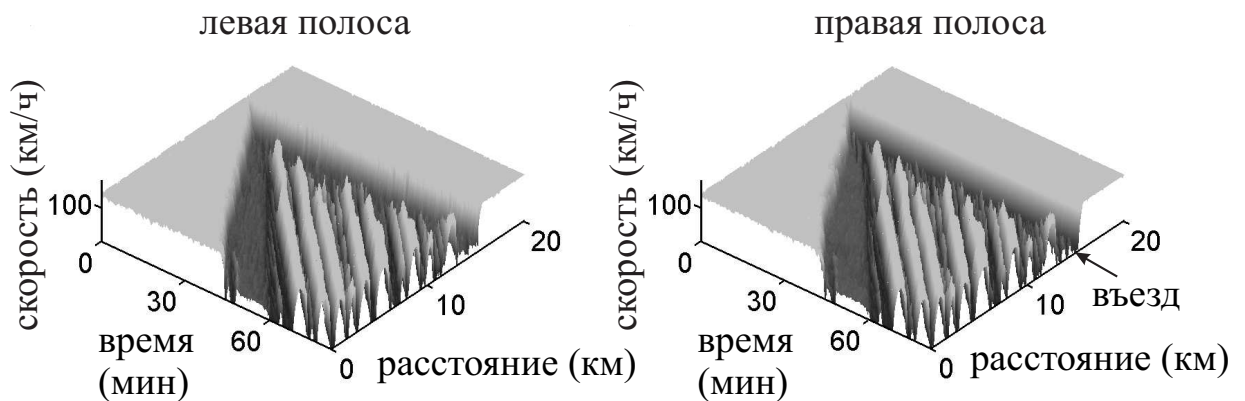


Рис. 2.17: Численное моделирование $S \rightarrow J$ перехода на двухполосной автодороге на основе трехфазной КА модели в § 2.3, в результате которого происходит формирование общей структуры, состоящей из всех трех фаз (свободного потока, синхронизованного потока, и широких движущихся кластеров). Скорость потока в пространстве и времени на левой полосе (рисунок слева) и на правой полосе (рисунок справа). $q_{on} = 900$ (а), 470 (б) автомашин/ч, $q_{in} = 2046$ (а) и 1475 (б) автомашин/ч на полосу. Рассчитанная величина выходного потока из широкого движущегося кластера $q_{out} = 1636$ автомашин/ч на полосу. Координата въезда $x_{on} = 15$ км.

модели с ситуативным временем задержки при ускорении (рис. 2.2 (а, б)), в которую включены гипотезы теории трех фаз, удаляются некоторые правила движения автомашины:

- (i) Удаляется расстояние синхронизации G и правило (б), заданное формулами (2.27), (2.28). В этом случае стационарные состояния КА модели лежат на фундаментальной диаграмме (рис. 2.18 (а, б)).
- (ii) Удаляется правило (в) “адаптация скорости в пределах расстояния синхронизации”, заданное формулой (2.29).
- (iii) Удаляется правило (г) “случайное переускорение в пределах расстояния синхронизации без смены полосы” заданное формулой (2.30).

Оставшиеся правила движения автомашины на одной полосе имеют следующий вид:

(а) “ускорение”:

$$v_{n+1} = \min(v_n + 1, v_{\text{free}}), \quad (2.80)$$

(б) “торможение”:

$$v_{n+1} = \min(v_{n+1}, g_n), \quad (2.81)$$

(в) “случайное торможение (рандомизация)”:

$$\text{с вероятностью } p, \quad v_{n+1} = \max(v_{n+1} - 1, 0), \quad (2.82)$$

(г) “перемещение автомашины за один шаг по времени”:

$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1}. \quad (2.83)$$

Полученная в результате КА модель (2.80)–(2.83) является NaSch КА моделью с задержкой при ускорении (“slow-to-start rule”) [16, 232].

Качественное различие между трехфазными КА моделями, разработанными в диссертации, и NaSch КА моделью, можно видеть из сравнения результатов численного моделирования, представленных на рис. 2.10

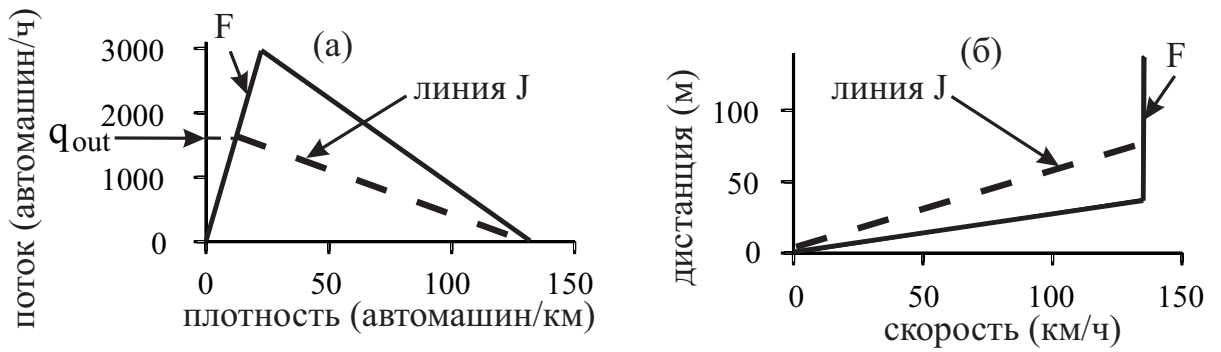


Рис. 2.18: Стационарные состояния Nagel-Schreckenberg КА модели в плоскости поток–плотность (а) и в плоскости дистанция–скорость (б). F – свободный поток; линия J представляет собой линию J Кернера, которая описывает задний по потоку фронт широкого движущегося кластера; q_{out} – это величина потока, относящаяся к свободному потоку позади широкого движущегося кластера.

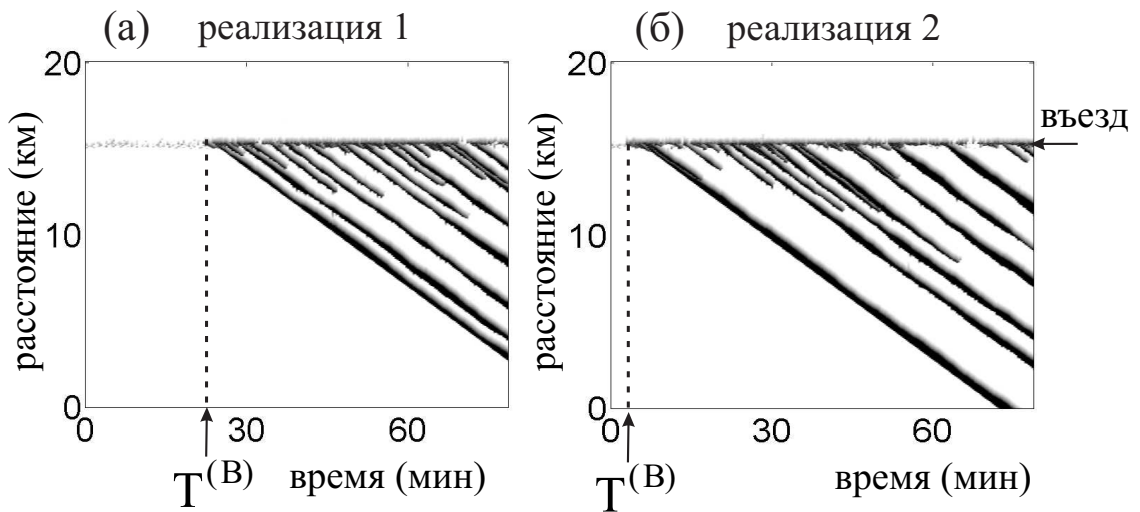


Рис. 2.19: Вероятностные свойства $F \rightarrow J$ перехода в NaSch КА модели (2.80)–(2.83): (а, б) – скорость потока, показанная серым цветом переменной степени (степень серого цвета меняется от белого до черного, когда скорость уменьшается от 120 км/ч (белый) до 0 км/ч (черный)). На (а, б) показаны две различные реализации 1, 2, которые относятся к вероятности $F \rightarrow J$ перехода в NaSch КА модели $P_{GM}^{(B)} = 0.775$, вычисленной при $q_{in} = 1731$ автомашин/ч. Время наблюдения $T_{ob} = 30$ мин.

и рис. 2.19. Заметим, что во всех реальных данных спонтанный переход к плотному потоку – это $F \rightarrow S$ переход, происходящий в метастабильном свободном потоке (§ 1.4). В соответствии с этими данными, в теории трех фаз спонтанный переход к плотному потоку является $F \rightarrow S$ переходом (рис. 2.10). На рис. 2.10 $F \rightarrow S$ переход происходит только после некоторого случайного времени задержки и приводит в дальнейшем к формированию расширяющейся структуры синхронизованного потока (WSP).

Напротив, в NaSch КА модели спонтанный переход к плотному потоку представляет собой возникновение движущихся кластеров внутри свободного потока, метастабильного относительно $F \rightarrow J$ перехода (рис. 2.19). Из-за метастабильности свободного потока $F \rightarrow J$ переход происходит со случайной временной задержкой. Однако, вместо синхронизованного потока, который наблюдается во всех реальных данных измерений, $F \rightarrow J$ переход приводит к формированию широких движущихся кластеров непосредственно в свободном потоке на узком месте.

Глава 3.

Стохастическая микроскопическая модель в рамках теории трех фаз

3.1. Мотивация

После того, как Кернер сформулировал теорию трех фаз [113, 114, 116–118] (§ 1.4), одной из важных задач стала разработка *математической* микроскопической модели транспортного потока в рамках теории трех фаз.

Целью данной главы является рассмотреть разработанную в диссертации стохастическую микроскопическую трехфазную модель. Первоначальная версия этой трехфазной модели была непрерывна по координате и дискретна по времени [147, 148]. В рассматриваемой в данной Главе дискретной версии этой модели, вместо непрерывной пространственной координаты [147, 148] используется дискретная пространственная координата с достаточно малым шагом дискретизации δx . Кроме того, как и модель клеточных автоматов (Глава 2), данная модель дискретна по времени с шагом $\tau = 1\text{с}$. Соответственно, скорость автомашины и ее ускорения также являются дискретными величинами с шагом дискретизации $\delta v = \delta x/\tau$ и $\delta a = \delta v/\tau$ соответственно. В приведенных ниже правилах модели для движения автомашины используются безразмерные значения координаты, скорости и ускорения, измеренные соответственно в единицах δx , δv и δa . Время измеряется в единицах τ , поэтому приведенная для наглядности в правилах движения автомашины величина τ фактически является безразмерной и равна единице.

Величина шага дискретизации δx выбиралась достаточно малой, $\delta x = 0.01$ м, и определялась точностью вычисления скорости *в сравнении с* исходной непрерывной в пространстве стохастической трехфазной моделью [147]. Было найдено, что дискретная по координате модель показывает аналогичные свойства фазовых переходов и результирующих структур плотного потока, такие же, что и непрерывная по координате версия модели, если шаг δx удовлетворяет условиям

$$\delta x/\tau^2 \ll b, a, a^{(a)}, a^{(b)}, a^{(0)}, \quad (3.1)$$

где $a, a^{(a)}, a^{(b)}, a^{(0)}$ – параметры модели для величин ускорения и торможения автомашины, рассмотренные ниже.

3.2. Основные правила движения для модели одинаковых водителей и одинаковых автомашин

В разработанной дискретной модели одинаковых водителей и одинаковых автомашин применяются следующие последовательные правила для численного моделирования движения автомашин на автодороге:

$$v_{n+1} = \max(0, \min(v_{\text{free}}, \tilde{v}_{n+1} + \xi_n, v_n + a\tau, v_{s,n})), \quad (3.2)$$

$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1}\tau, \quad (3.3)$$

где индекс n отвечает дискретным моментам времени $t_n = \tau n$, $n = 0, 1, \dots$, x_n и v_n координата и скорость автомашины на шаге n , a – максимальное ускорение, \tilde{v}_n – скорость автомашины без флуктуаций скорости ξ_n :

$$\tilde{v}_{n+1} = \min(v_{\text{free}}, v_{s,n}, v_{c,n}), \quad (3.4)$$

$$v_{c,n} = \begin{cases} v_n + \Delta_n & \text{если } g_n \leq G_n \\ v_n + a_n\tau & \text{если } g_n > G_n, \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\Delta_n = \max(-b_n\tau, \min(a_n\tau, v_{\ell,n} - v_n)), \quad (3.6)$$

$$g_n = x_{\ell,n} - x_n - d, \quad (3.7)$$

нижний индекс ℓ обозначает переменные, относящиеся к автомашине впереди, $v_{s,n}$ – безопасная скорость на шаге n , v_{free} – максимальная скорость в свободном потоке на автодороге, ξ_n описывает случайные флуктуации скорости, g_n – расстояние до машины впереди, G_n – расстояние синхронизации на шаге n . Все автомашины имеют одинаковую длину d . Длина автомашины d включает также минимальное расстояние до автомашины впереди, когда обе машины стоят внутри затора. Величины $a_n \geq 0$ и $b_n \geq 0$ в (3.5), (3.6) ограничивают величину ускорения или замедления в условиях, когда автомашина ускоряется или адаптирует свою скорость к скорости автомашины впереди.

3.2.1. Расстояние синхронизации и гипотетические стационарные состояния синхронизованного потока

Формулы (3.5), (3.6) описывают адаптацию скорости автомашины к скорости автомашины впереди нее, т.е., эффект адаптации скорости в синхронизованном потоке (§ 1.6.4). Такая адаптация скорости имеет место в пределах расстояния синхронизации G_n : при

$$g_n \leq G_n \quad (3.8)$$

водитель стремится подстроить скорость своей автомашины к скорости автомашины впереди. Это означает, что автомашина тормозит, когда $v_n > v_{\ell,n}$, и ускоряется, когда $v_n < v_{\ell,n}$ [147].

В (3.5), расстояние синхронизации G_n зависит от скорости автомашины v_n и от скорости автомашины впереди нее $v_{\ell,n}$:

$$G_n = G(v_n, v_{\ell,n}), \quad (3.9)$$

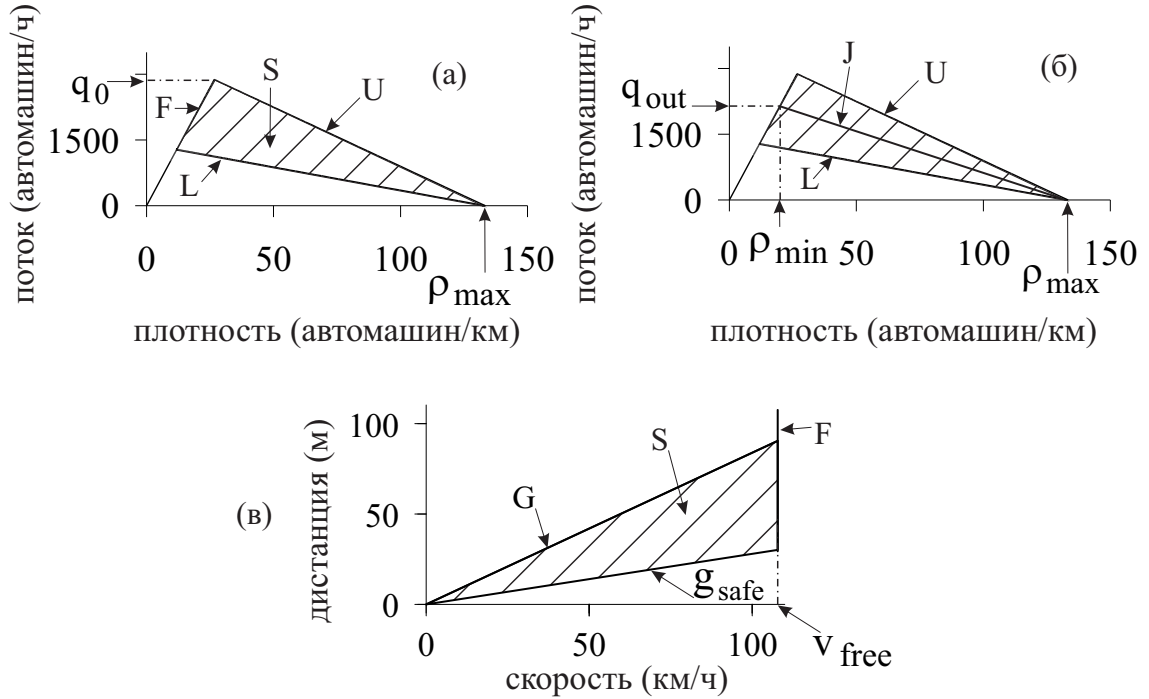


Рис. 3.1: Стационарные состояния для модели транспортного потока в рамках теории трех фаз на плоскости поток-плотность (а, б) и плоскости дистанция-скорость (в). F – свободный поток, S – синхронизованный поток (заштрихованные 2D-области на рисунках (а)–(в)). На (а, б) L и U – это соответственно нижняя и верхняя границы 2D-области в стационарных состояниях синхронизованного потока. Линия J на рис. (б) – это линия J Кернера, наклон которой соответствует характеристической скорости заднего (по потоку) фронта широкого движущегося кластера; на плоскости поток-плотность линия J описывает распространение заднего по потоку фронта широкого движущегося кластера с постоянной средней скоростью v_g .

$$G(u, w) = \max(0, \lfloor k\tau u + a^{-1}u(u - w) \rfloor), \quad (3.10)$$

где $k > 1$ – константа, скобки $\lfloor z \rfloor$ означают целую часть числа z .

Эффект адаптации скорости в пределах расстояния синхронизации G отвечает гипотезе теории трех фаз Кернера: гипотетические стационарные состояния синхронизованного потока покрывают двумерную область на плоскости “поток–плотность” (рис. 3.1 (а)) и на плоскости “дистанция–скорость” (рис. 3.1 (б)).

3.2.2. Флуктуации скорости автомашины

В модели случайное ускорение и торможение автомашины применяется в зависимости от того, ускоряется ли автомашина, или она тормозит, или же поддерживает свою скорость:

$$\xi_n = \begin{cases} \xi_a & \text{if } S_{n+1} = 1 \\ -\xi_b & \text{if } S_{n+1} = -1 \\ \xi^{(0)} & \text{if } S_{n+1} = 0. \end{cases} \quad (3.11)$$

В (3.11) случайные ускорение и торможение автомашины зависят от введенного в модели состояния движения автомашины S_{n+1} , которое определяется формулой

$$S_{n+1} = \begin{cases} -1 & \text{if } \tilde{v}_{n+1} < v_n \\ 1 & \text{if } \tilde{v}_{n+1} > v_n \\ 0 & \text{if } \tilde{v}_{n+1} = v_n. \end{cases} \quad (3.12)$$

В (3.11) ξ_b , $\xi^{(0)}$, и ξ_a – это случайные источники для торможения и ускорения, которые определяются следующим образом:

$$\xi_b = a^{(b)}\tau\Theta(p_b - r), \quad (3.13)$$

$$\xi^{(0)} = a^{(0)}\tau \begin{cases} -1 & \text{if } r < p^{(0)} \\ 1 & \text{if } p^{(0)} \leq r < 2p^{(0)} \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \text{and } v_n > 0 \quad (3.14)$$

$$\xi_a = a^{(a)}\tau\Theta(p_a - r), \quad (3.15)$$

p_b это вероятность случайного торможения, p_a это вероятность случайного ускорения, $p^{(0)}$ и $a^{(0)} \leq a$ являются константами, $r = \text{rand}(0, 1)$, $\Theta(z) = 0$ при $z < 0$ и $\Theta(z) = 1$ при $z \geq 0$, $a^{(a)}$ и $a^{(b)}$ являются параметрами модели (см. таблицу 3.1), которые в некоторых приложениях могут выбираться как функции скорости $a^{(a)} = a^{(a)}(v_n)$ и $a^{(b)} = a^{(b)}(v_n)$.

3.2.3. Случайная временная задержка ускорения и торможения

Чтобы моделировать случайную временную задержку для ускорения и торможения автомашины, a_n и b_n в (3.6) выбирались как следующие случайные функции:

$$a_n = a\Theta(P_0 - r_1), \quad (3.16)$$

$$b_n = a\Theta(P_1 - r_1), \quad (3.17)$$

$$P_0 = \begin{cases} p_0 & \text{if } S_n \neq 1 \\ 1 & \text{if } S_n = 1, \end{cases} \quad (3.18)$$

$$P_1 = \begin{cases} p_1 & \text{if } S_n \neq -1 \\ p_2 & \text{if } S_n = -1, \end{cases} \quad (3.19)$$

где $r_1 = \text{rand}(0, 1)$, p_1 – константа, $p_0 = p_0(v_n)$ и $p_2 = p_2(v_n)$ являются функциями скорости (см. таблицу 3.1).

3.2.4. Безопасная скорость

В модели безопасная скорость $v_{s,n}$ в (3.2) выбиралась в следующем виде:

$$v_{s,n} = \min(v_n^{(\text{safe})}, g_n/\tau + v_\ell^{(\text{a})}), \quad (3.20)$$

где $v_\ell^{(\text{a})}$ это “ожидаемая” скорость автомашины впереди, функция

$$v_n^{(\text{safe})} = \lfloor v^{(\text{safe})}(g_n, v_{\ell,n}) \rfloor \quad (3.21)$$

в (3.20) относится к безопасной скорости $v^{(\text{safe})}(g_n, v_{\ell,n})$ в модели Крауф и др. [201], которая, в свою очередь, является решением уравнения Gipps [84]

$$v^{(\text{safe})}\tau_{\text{safe}} + X_d(v^{(\text{safe})}) = g_n + X_d(v_{\ell,n}), \quad (3.22)$$

где τ_{safe} – константа, задающая безопасный временной интервал, $X_d(u)$ – тормозной путь, который пройдет автомашина, движущаяся первоначально со скоростью u , до момента своей остановки.

Безопасная скорость $v^{(\text{safe})}$ как решение уравнения (3.22) была найдена Крауф и др. [201] для случае тормозного пути $X_d(u)$, рассчитанного при постоянном торможении b , и при $\tau_{\text{safe}} = \tau$

$$v^{(\text{safe})}(g_n, v_{\ell,n}) = b\tau(\alpha_{\text{safe}} + \beta_{\text{safe}}), \quad (3.23)$$

где

$$\alpha_{\text{safe}} = \left[\sqrt{2 \frac{X_d(v_{\ell,n}) + g_n}{b\tau^2} + \frac{1}{4}} - \frac{1}{2} \right], \quad (3.24)$$

$$\beta_{\text{safe}} = \frac{X_d(v_{\ell,n}) + g_n}{(\alpha_{\text{safe}} + 1)b\tau^2} - \frac{\alpha_{\text{safe}}}{2}. \quad (3.25)$$

Безопасная скорость в модели Крауф и др. [201] обеспечивает движение без столкновений автомашин при условии, временной интервал g_n/v_n до автомашины впереди не меньше, чем величина τ , т.е., если $g_n \geq v_n\tau$ [201]. В модели предполагалось, что в некоторых случаях, главным образом в результате смены полосы или въезда автомашины на основную дорогу с полосы въезда, дистанция g_n может иногда стать меньше, чем $v_n\tau$. В этих критических ситуациях, движение без столкновений автомашин в модели обеспечивается вторым членом в формуле (3.20), в которой используется определенный прогноз ($v_\ell^{(a)}$) для скорости автомашины впереди на следующем шаге. Соответствующая “ожидаемая” скорость автомашины впереди $v_\ell^{(a)}$ задается формулой

$$v_\ell^{(a)} = \max(0, \min(v_{\ell,n}^{(\text{safe})}, v_{\ell,n}, g_{\ell,n}/\tau) - a\tau), \quad (3.26)$$

где $v_{\ell,n}^{(\text{safe})}$ – безопасная скорость (3.21), (3.23)–(3.25) для автомашины впереди, $g_{\ell,n}$ – дистанция перед автомашиной впереди. Численное моделирование показывает, что формулы (3.20), (3.21), (3.23)–(3.26) приводят к движению без столкновений автомашин в широком диапазоне параметров узких мест вблизи въезда на автодорогу и съезда с нее (§ 3.4 и 3.4.3) и для выбранных правил смены полосы (§ 3.3).

3.2.5. Граничные и начальные условия

В модели применялись открытые граничные условия. В начале дороги новые автомашины генерировались одна за одной на каждой полосе в моменты времени

$$t^{(m)} = \tau \lceil m\tau_{\text{in}}/\tau \rceil, \quad m = 1, 2, \dots \quad (3.27)$$

В (3.27), $\tau_{\text{in}} = 1/q_{\text{in}}$, q_{in} – величина входного потока на одну полосу, скобки $\lceil z \rceil$ означают ближайшее целое, большее или равное z . Новая автомашина появлялась на автодороге, только если расстояние от начала автодороги ($x = x_{\text{b}}$) до координаты $x = x_{\ell,n}$ ближайшей к началу автомашины было не меньше, чем минимальное безопасное расстояние $v_{\ell,n}\tau + d$:

$$x_{\ell,n} - x_{\text{b}} \geq v_{\ell,n}\tau + d, \quad (3.28)$$

где $n = t^{(m)}/\tau$. Иначе условие (3.28) проверялось в момент времени $(n+1)$ следующий к n (3.27), и т.д., пока условие (3.28) не выполнится. Тогда новая автомашина появлялась на автодороге. После этого номер m в (3.27) увеличивался на 1.

Скорость v_n и координата x_n новой автомашины устанавливались как

$$\begin{aligned} v_n &= v_{\ell,n}, \\ x_n &= \max(x_{\text{b}}, x_{\ell,n} - \lfloor v_n\tau_{\text{in}} \rfloor). \end{aligned} \quad (3.29)$$

Величина потока q_{in} при моделировании выбиралась таким образом, чтобы величина $v_{\text{free}}\tau_{\text{in}}$ была целая. В начальном состоянии ($n = 0$) все автомашины имели скорость свободного потока $v_n = v_{\text{free}}$ и располагались на одинаковых расстояниях друг от друга $x_{\ell,n} - x_n = v_{\text{free}}\tau_{\text{in}}$.

После того как автомашина достигала конца автодороги, она удалялась. Перед этим, ближайшая к концу автодороги автомашина сохраняла свою скорость и полосу, а для следующей за ней автомашины “ожидаемая” скорость $v_{\ell}^{(a)}$ в (3.20) выбиралась равной скорости ближайшей к концу автодороги автомашины.

Таблица 3.1: Параметры модели для правил движения автомашин на одной полосе, часто используемые для моделирования ИТС

$$\begin{aligned}
 \tau_{\text{safe}} = \tau &= 1 \text{ с}, \quad d = 7.5\text{м}/\delta x, \\
 \delta x &= 0.01 \text{ м}, \quad \delta v = 0.01\text{мс}^{-1}, \quad \delta a = 0.01\text{мс}^{-2}, \\
 v_{\text{free}} &= 30\text{мс}^{-1}/\delta v, \quad b = 1\text{мс}^{-2}/\delta a, \quad a = 0.5 \text{ мс}^{-2}/\delta a, \\
 k &= 3, \quad p_1 = 0.3, \quad p_b = 0.1, \quad p_a = 0.17, \quad p^{(0)} = 0.005, \\
 p_0(v_n) &= 0.575 + 0.125 \min(1, v_n/v_{01}), \\
 p_2(v_n) &= 0.48 + 0.32\Theta(v_n - v_{21}), \\
 v_{01} &= 10\text{мс}^{-1}/\delta v, \quad v_{21} = 15\text{мс}^{-1}/\delta v, \\
 a^{(0)} &= 0.2a, \quad a^{(a)} = a^{(b)} = a.
 \end{aligned}$$

3.3. Правила смены полосы на автодороге с двумя полосами

Как и в других моделях смены полосы на автодороге с двумя полосами (например [234]), в рассматриваемой модели автомашина меняет полосу на шаге n с вероятностью p_c , когда выполнены условия для намерения сменить полосу и условия для безопасной смены полосы.

Условия для намерения водителя сменить полосу с правой на левую ($R \rightarrow L$) и с левой на правую ($L \rightarrow R$) выбирались похожими на условия, предложенные в модели Nagel и др. [234]:

$$R \rightarrow L : \quad v_n^+ \geq v_{\ell,n} + \delta_1 \quad \text{and} \quad v_n \geq v_{\ell,n}, \quad (3.30)$$

$$L \rightarrow R : \quad v_n^+ > v_{\ell,n} + \delta_1 \quad \text{or} \quad v_n^+ > v_n + \delta_1, \quad (3.31)$$

где δ_1 – постоянная.

При выполнении данных условий автомашина меняла полосу, если выполнялись следующие условия для безопасной смены полосы:

$$g_n^+ > \min(v_n \tau, G_n^+), \quad (3.32)$$

$$g_n^- > \min(v_n^- \tau, G_n^-), \quad (3.33)$$

Таблица 3.2: Параметры смены полосы, часто используемые в моделировании ИТС

$$\delta_1 = 1\text{мс}^{-1}/\delta v, L_a = 150\text{м}/\delta x, p_c = 0.2.$$

где

$$g_n^+ = x_n^+ - x_n - d, \quad g_n^- = x_n - x_n^- - d, \quad (3.34)$$

$$G_n^+ = G(v_n, v_n^+), \quad G_n^- = G(v_n^-, v_n), \quad (3.35)$$

$G(u, w)$ дается формулой (3.10).

В формулах (3.30)–(3.35) и ниже, верхние индексы “+” и “–” обозначают переменные и параметры, относящиеся к едущим по соседней полосе ближайшим автомобилям впереди (“+”) и позади (“–”), между которыми водитель хочет въехать при смене полосы. В правилах $R \rightarrow L$ (3.30) и $L \rightarrow R$ (3.31), значение скорости v_n^+ при условии $g_n^+ > L_a$ или значение скорости $v_{\ell,n}$ условия $g_n > L_a$ заменялись на ∞ , где L_a - постоянный параметр (“look-ahead distance”) (см. таблицу 3.2).

3.4. Правила движения автомобилей в моделях узкого места на автодороге

3.4.1. Модели узкого места из-за въезда/съезда и из-за слияния полос

Модели узкого места из-за въезда на автодорогу, съезда с нее, а также из-за слияния двух полос в одну, показаны на рис. 2.6 в § 2.3.4.

Узкое место из-за въезда на автодорогу состоит из двух частей (рис. 2.6 (а)):

- (i) Область въезда длины L_m , где автомобили могут въехать на основную дорогу с въездной полосы.

- (ii) Часть въездной полосы длины L_r до области въезда, где автомашины двигаются по полосе в соответствии с правилами модели § 3.2 с максимальной скоростью $v_{\text{free}} = v_{\text{free on}}$.

В начале полосы въезда ($x = x_{\text{on}}^{(b)}$) величина потока во въезд q_{on} задается таким же образом, как и величина потока q_{in} на основной автодороге.

Узкое место из-за съезда с автодороги состоит из двух частей (рис. 2.6 (б)):

- (i) Область съезда длины L_m где автомашины могут съехать с основной дороги на полосу съезда.
- (ii) Часть съездной полосы длины L_r после области съезда, где автомашины двигаются по полосе в соответствии с правилами модели § 3.2 с максимальной скоростью $v_{\text{free}} = v_{\text{free off}}$.

В пределах области длины $L_m + L_c$ на основной автодороге ($x_{\text{off}}^{(s)} \leq x \leq x_{\text{off}}^{(b)}$ на рис. 2.6 (б)), автомашины, едущие на съезд, должны перейти с левой полосы на правую на основной автодороге. Величина потока автомашин, едущих на съезд с автодороги, задается процентом η_{off} от величины потока q_{in} . С этой целью, в начале автодороги автомашина получает “атрибут”, который обозначает данную машину как едущую на съезд, если выполняется условие

$$r_{\text{off}} < \eta_{\text{off}}/100\% \quad (3.36)$$

где $r_{\text{off}} = \text{rand}(0, 1)$.

В модели узкого места из-за слияния полос (рис. 2.6 (в)) в пределах области длины L_c до точки слияния $x = x_R$ автомашины должны перейти с правой полосы на левую.

3.4.2. Модель движущегося узкого места

Модель движущегося узкого места на двухполосной автодороге показана на рис. 2.7(а) в § 2.3.4 вдали от въездов/съездов, и на рис. 2.7(б, в) перед въездом и перед съездом соответственно.

Движущееся узкое место на автодороге создается отдельной медленной автомашиной, движущейся по правой полосе с заметно меньшей скоростью v_M , где $v_M < v_{\text{free}}$. Если медленную автомашину догоняет другая автомашина, движущаяся по правой полосе, то в пределах области длиной L_M (рис. 2.7) эта автомашина стремится перейти с правой полосы на левую для обгона.

3.4.3. Правила движения автомашин в области въезда, съезда и слияния полос

3.4.3.1. Адаптация скорости в области узкого места, где автомашина меняет полосу

Для всех типов узких мест в области, где автомашина меняет полосу, применяются одинаковые правила: водитель принимает во внимание расстояние до автомашины впереди и ее скорость как для текущей, так и для соседней полосы. Соответственно, вместо формулы (3.5), в (3.4) для скорости $v_{c,n}$ используются следующие формулы:

$$v_{c,n} = \begin{cases} v_n + \Delta_n^+ & \text{если } g_n^+ \leq G(v_n, \hat{v}_n^+) \\ v_n + a_n \tau & \text{если } g_n^+ > G(v_n, \hat{v}_n^+), \end{cases} \quad (3.37)$$

$$\Delta_n^+ = \max(-b_n \tau, \min(a_n \tau, \hat{v}_n^+ - v_n)), \quad (3.38)$$

$$\hat{v}_n^+ = \max(0, \min(v_{\text{free}}, v_n^+ + \Delta v_r^{(2)})), \quad (3.39)$$

$\Delta v_r^{(2)}$ – константа (см. таблицу 3.3).

Как и в правилах смены полосы § 3.3, верхние индексы $+$ и $-$ обозначают переменные и параметры, относящиеся соответственно к ближайшим соседям впереди и позади на соседней полосе, на которую рассматриваемая автомашина должна перейти.

Безопасная скорость $v_{s,n}$ в (3.2), (3.4) для автомашины, ближайшей к концу полосы въезда, съезда и точке слияния полос, выбирается следующим образом:

$$v_{s,n} = \lfloor v^{(\text{safe})}(x_{\text{on}}^{(e)} - x_n, 0) \rfloor \quad (3.40)$$

для модели въезда и

$$v_{s,n} = \min (v_n^{(\text{safe})}, g_n/\tau + v_\ell^{(\text{a})}, \lfloor v^{(\text{safe})}(x_{\text{off}}^{(\text{e})} - x_n - L_s, 0) \rfloor) \quad (3.41)$$

для модели съезда, где L_s – константа (см. таблицу 3.3).

3.4.3.2. Условие безопасности при смене полосы в моделях узкого места

В моделях узкого места, автомашины меняют полосу, если выполнено условие (*) или условие (**). Условие безопасной смены полосы (*):

$$\begin{aligned} g_n^+ &> \min(\hat{v}_n\tau, G(\hat{v}_n, v_n^+)), \\ g_n^- &> \min(v_n^-\tau, G(v_n^-, \hat{v}_n)), \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\hat{v}_n = \min(v_n^+, v_n + \Delta v_r^{(1)}), \quad (3.43)$$

$\Delta v_r^{(1)} > 0$ – константа (см. таблицу 3.3).

Условие безопасной смены полосы (**):

$$x_n^+ - x_n^- - d > g_{\text{target}}^{(\text{min})}, \quad (3.44)$$

где

$$g_{\text{target}}^{(\text{min})} = \lfloor \lambda_b v_n^+ + d \rfloor, \quad (3.45)$$

λ_b – константа. В дополнение к (3.44), условие безопасной смены полосы (**) включает дополнительное условие, что в течении временного шага n автомашина проходит среднюю точку

$$x_n^{(\text{m})} = \lfloor (x_n^+ + x_n^-)/2 \rfloor \quad (3.46)$$

между координатами двух ближайших автомашин на соседней полосе, т.е.

Таблица 3.3: Параметры в моделях различных узких мест, часто используемые для численного моделирования ИТС

$\lambda_b = 0.75$ для всех узких мест, $L_c = 1.0$ или $0.7\text{км}/\delta x$ для модели съезда, $L_M = 0.3\text{км}/\delta x$ для модели движущегося узкого места, $v_{\text{free on}} = 22.2\text{мс}^{-1}/\delta v$, $v_{\text{free off}} = 25\text{мс}^{-1}/\delta v$, $\Delta v_r^{(2)} = 5 \text{мс}^{-1}/\delta v$ для моделей въезда и движущегося узкого места, $\Delta v_r^{(2)} = -2.5\text{мс}^{-1}/\delta v$ для модели съезда, $L_r = 1\text{км}/\delta x$, $\Delta v_r^{(1)} = 10\text{мс}^{-1}/\delta v$, $L_m = 0.3$ и $0.5\text{км}/\delta x$ соответственно для моделей въезда и съезда.

должно быть выполнено условие

$$\begin{aligned}
 & x_{n-1} < x_{n-1}^{(m)} \text{ and } x_n \geq x_n^{(m)} \\
 & \text{or} \\
 & x_{n-1} \geq x_{n-1}^{(m)} \text{ and } x_n < x_n^{(m)}.
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

3.4.3.3. Скорость и координата автомашины после смены полосы в моделях узкого места

После перехода на соседнюю полосу скорость автомашины устанавливается следующим образом

$$v_n = \hat{v}_n. \tag{3.48}$$

Для условий (*), координата автомашины x_n остается той же самой. Для условий (**), координата автомашины x_n выбирается равной координате средней точки $x_n^{(m)}$:

$$x_n = x_n^{(m)}. \tag{3.49}$$

3.5. Основные отличия стохастической микроскопической модели от классических микроскопических моделей

В разработанной стохастической микроскопической модели в рамках теории трех фаз, благодаря математическому описанию стохастического переускорения с задержкой и эффекта адаптации скорости внутри состояний синхронизованного потока, переход от свободного к плотному потоку – это переход от метастабильного свободного потока к синхронизованному потоку (F→S переход), как наблюдается во всех эмпирических данных. Никакая классическая модель транспортного потока, включая стохастические модели, не может описывать эмпирической метастабильности свободного потока по отношению к переходу к синхронизованному потоку.

Для математического моделирования интеллектуальных транспортных технологий (См. 5), включая моделирование влияния автоматических машин на транспортный поток, в разработанной стохастической микроскопической модели введено так называемое состояние движения машины S_n , которое позволяет описывать случайное ускорение и замедление машины, а также времена стохастической задержки водителя при ускорении и замедлении, независимо друг от друга в разных состояниях транспортного потока.

Глава 4.

Разработка алгоритмов и комплекса программ для моделирования пространственно-временных структур транспортного потока

4.1. Макроскопическая Z-характеристика для перехода от свободного к плотному транспортному потоку ($F \rightarrow S$ переход)

В этом параграфе приведены результаты численных экспериментов по моделированию стохастических характеристик перехода от свободного к плотному транспортному потоку ($F \rightarrow S$ переход), выполненные на основе стохастической микроскопической трехфазной модели Главы 3 [148].

Для проведения численных экспериментов по моделированию стохастических характеристик перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места на автодороге, в рамках стохастической микроскопической трехфазной модели был разработан алгоритм, в котором применены специальные правила (в отличие от правил смены полосы) для въезда машин на основную дорогу, позволяющие обеспечить минимальные флуктуации скорости при больших потоках въезжающих машин.

Обозначим амплитуду критической случайной составляющей локально-

го возмущения скорости вблизи узкого места на автодороге как $\Delta v_{\text{cr, FS}}^{(\text{B})}$:

$$\Delta v_{\text{cr, FS}}^{(\text{B})} = v_{\text{free}}^{(\text{B})} - v_{\text{cr, FS}}^{(\text{B})}, \quad (4.1)$$

где $v_{\text{free}}^{(\text{B})}$ обозначает среднюю скорость внутри локального перманентного возмущения скорости в свободном потоке вблизи узкого места на автодороге, $v_{\text{cr, FS}}^{(\text{B})}$ обозначает среднюю скорость внутри критического локального возмущения скорости в свободном потоке вблизи узкого места (пунктирная кривая на рис. 4.1). Случайное возникновение критического локального возмущения скорости приводит переходу от свободного к плотному потоку (F→S переход) вблизи узкого места и может рассматриваться как критический зародыш для такого перехода с критической амплитудой $\Delta v_{\text{cr, FS}}^{(\text{B})}$ (4.1). Соответственно, скорость $v_{\text{cr, FS}}^{(\text{B})}$ представляет собой среднюю скорость внутри критического зародыша для F→S перехода.

Теоретическая Z-характеристики для перехода от свободного к плотному транспортному потоку (рис. 4.1) состоит из метастабильных состояний фазы F и фазы S (сплошные кривые F и S соответственно) вместе состояниями, показывающей скорость $v_{\text{cr, FS}}^{(\text{B})}(q_{\text{sum}})$ внутри критического возмущения для F→S перехода (пунктирная кривая $v_{\text{cr, FS}}^{(\text{B})}$ на рис. 4.1 между метастабильными состояниями фазы F и фазы S).

Найденное в численном эксперименте уменьшение амплитуды критического возмущения $\Delta v_{\text{cr, FS}}^{(\text{B})}(q_{\text{sum}})$ (4.1) для F→S перехода при увеличении полного потока q_{sum} на автодороге соответствует еще одному результату численного эксперимента, что вероятность перехода от свободного к плотному транспортному потоку $P^{(\text{B})}(q_{\text{sum}})$ в течении времени наблюдения $T_{\text{об}}$ является растущей функцией потока q_{sum} (рис. 4.2).

Следует подчеркнуть, что теоретическая Z-характеристика для перехода от свободного к плотному потоку (рис. 4.1) является макроскопической характеристикой. Это означает, что она получена на основе усреднения большого числа реализаций, в которых в численном эксперименте происходил переход от свободного к плотному потоку (см. обсуждение в § 2.4.3). Это большое число реализаций было выполнено для каждого значения потока q_{sum} . По этой причине состояния, показывающие скорость

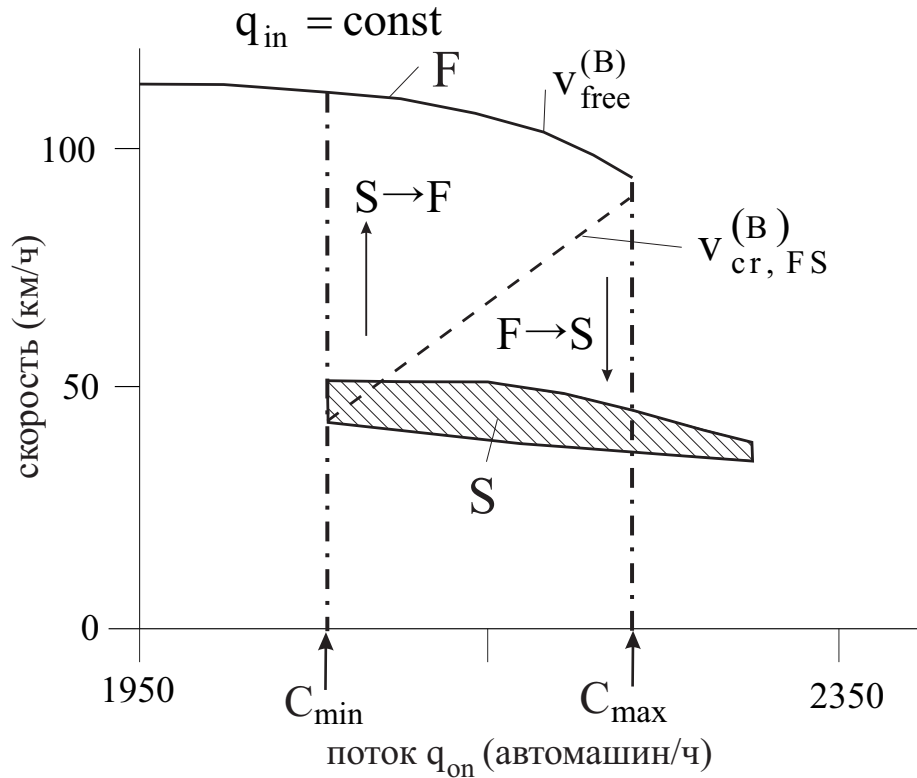


Рис. 4.1: Численное моделирование Z-характеристики для перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места из-за въезда на автодорогу, выполненное на основе стохастической микроскопической трехфазной модели Главы 3 [148]: Z-характеристика как функция суммарного потока $q_{sum} = q_{in} + q_{on}$ на узком месте. F – фаза свободного потока, S – фаза синхронизованного потока. Стрелки F → S и S → F иллюстрируют качественно прямой F → S и обратный S → F переходы соответственно. C_{min} – минимальная пропускная способность автодороги, C_{max} – максимальная пропускная способность автодороги. В расчетах поток q_{sum} изменялся за счет изменения потока во въезд q_{on} , в то время как поток по основной дороге q_{in} поддерживался постоянным ($q_{in} = 1756$ автомашин/ч).

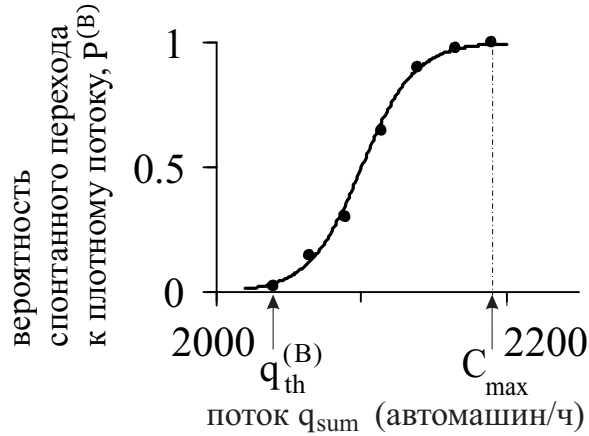


Рис. 4.2: Численное моделирование вероятности $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$ перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места из-за въезда в зависимости от величины полного потока на автодороге q_{sum} , выполненное на основе стохастической микроскопической трехфазной модели Главы 3. $q_{\text{th}}^{(B)}$ — это пороговая величина потока для перехода от свободного к плотному потоку, C_{max} — максимальная пропускная способность. Качественные свойства функции $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$ и ее характеристики аналогичны приведенным на рис. 2.10 в рамках КА модели в § 2.4.2.

внутри критического возмущения для $F \rightarrow S$ перехода (пунктирная кривая на рис. 4.1), отвечают некой средней скорости внутри критического возмущения. В каждой отдельной реализации, критическое возмущение для $F \rightarrow S$ перехода имело сложную пространственно-временную микроскопическую структуру.

4.1.1. Временная задержка перехода от свободного к плотному транспортному потоку ($F \rightarrow S$ переход) на узком месте автодороги

Временная задержка $T^{(B)}$ спонтанного перехода от свободного к плотному транспортному потоку ($F \rightarrow S$ переход) на узком месте автодороги (рис. 4.3(б) и 4.4) является случайной величиной. В различных реализациях при фиксированных значениях потоков q_{on} и q_{in} обычно получатся различные значения времени $T^{(B)}$. Чем меньше потоки q_{on} и/или q_{in} , тем больше среднее значение $T^{(B, \text{mean})}$ временной задержки $T^{(B)}$.

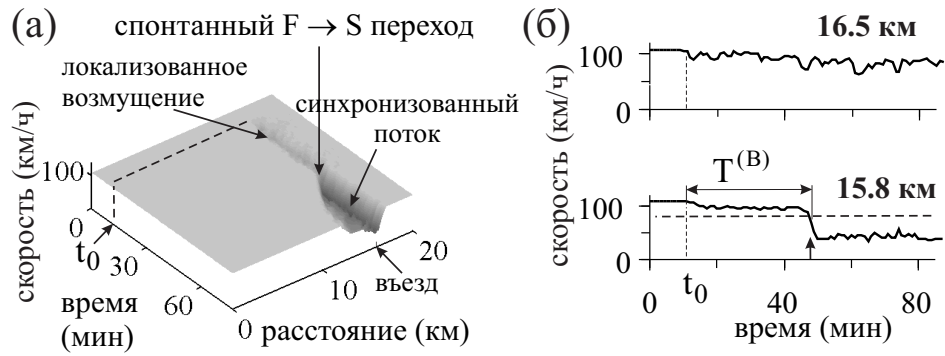


Рис. 4.3: Спонтанный переход от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места из-за въезда на автодорогу: скорость потока на основной дороге в пространстве и времени (а) и на виртуальных детекторах (б) в течении спонтанного $F \rightarrow S$ перехода. $q_{in} = 1800$ автомашин/ч и $q_{on} = 450$ автомашин/ч. На (б) штриховая горизонтальная линия показывает уровень скорости 85 км/ч. В момент времени $t = t_0$ включается въезд машин на основную автодорогу.

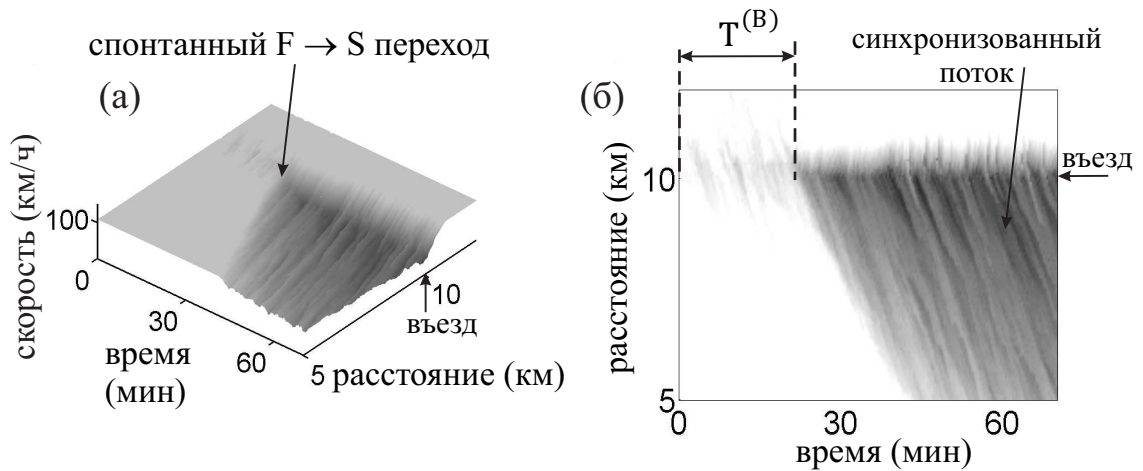


Рис. 4.4: Спонтанный переход от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места из-за въезда на автодорогу. (а, б) – скорость на основной дороге в пространстве и времени в течении спонтанного $F \rightarrow S$ перехода. $q_{in} = 2100$ автомашин/ч и $q_{on} = 230$ автомашин/ч.

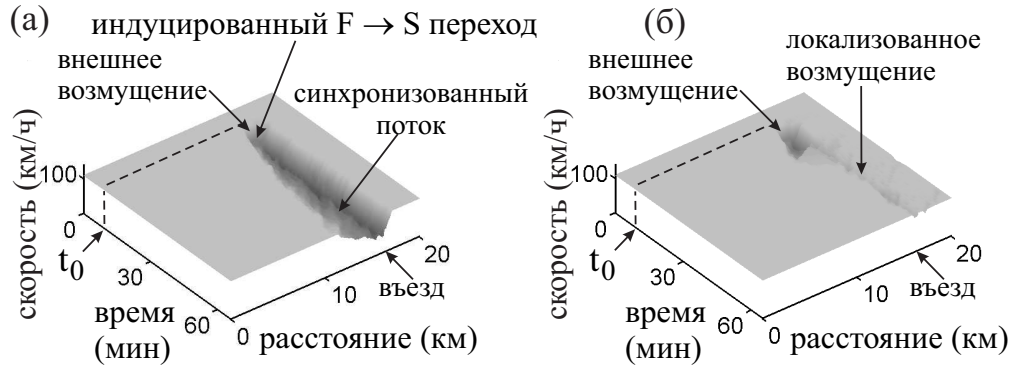


Рис. 4.5: Индуцированный переход от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узкого места из-за въезда на автодорогу: (а, б) – скорость на основной дороге в пространстве и времени в течение индуцированного $F \rightarrow S$ перехода, вызванного внешним локальным возмущением (а), и затухание внешнего возмущения (б). $q_{in} = 1800$ автомашин/ч и $q_{on} = 400$ автомашин/ч.

При больших значениях q_{in} в течении времени $T^{(B)}$ может спонтанно возникнуть много локальных возмущений в свободном потоке вблизи узкого места, которые сначала нарастают, а затем затухают, прежде чем появится возмущение, нарастание которого приведет к $F \rightarrow S$ переходу.

Критическая амплитуда локального возмущения, приводящего к $F \rightarrow S$ переходу, и соответственно среднее время задержки перехода $T^{(B, mean)}$ уменьшаются по мере увеличения потоков q_{in} и q_{on} .

4.1.2. Индуцированный переход от свободного к плотному транспортному потоку

Внешнее локальное возмущение может привести к индуцированному $F \rightarrow S$ переходу с последующим образованием структуры синхронизованного потока (рис. 4.5).

Такой индуцированный переход происходит, когда амплитуда внешнего возмущения превосходит критическую амплитуду $\Delta v_{cr, FS}^{(B)}$ (рис. 4.5(a)). В противном случае, возмущение затухает и свободный поток восстанавливается на основной дороге вблизи узкого места (рис. 4.5(б)).

4.2. Двойная Z-характеристика для фазовых переходов

4.2.1. S→J переход

Когда тенденция к образованию движущихся кластеров преобладает над тенденцией к поддержанию синхронизованного потока, возникает S→J неустойчивость в метастабильном синхронизованном потоке. S→J неустойчивость проявляется в возникновении нарастающих волн локального понижения скорости в синхронизованном потоке. S→J неустойчивость приводит к S→J переходу, т.е. к образованию широких движущихся кластеров. Развитие S→J неустойчивости происходит в результате эффекта переторможения, который также ответственен за классическую неустойчивость транспортного потока, впервые введенную в работах Herman, Gazis, Montroll, Potts, Rothery, и Chandler [46, 82, 83, 97]. По этой причине, метастабильность синхронизованного потока относительно S→J перехода связана с классической неустойчивостью транспортного потока, предложенной Herman, Gazis, Montroll, Potts, Rothery, и Chandler.

Прямой S→J и обратный J→S переходы фазовых могут быть представлены с помощью Z-характеристики для S→J и J→S фазовых переходов (рис. 4.6). Z-характеристика для S→J и J→S фазовых переходов является макроскопической характеристикой, представляющей эти фазовые переходы на плоскости скорость–поток. Z-характеристика состоит из 2D-области состояний синхронизованного потока (S), состояний со средней (макроскопической) скоростью $v_{cr, SJ}$ внутри критического возмущения, требуемого для S→J перехода (пунктирная кривая на рис. 4.6), и состояний со средней скоростью близкой к нулю, относящихся к фазе широкого движущегося кластера (J).

Стрелка, обозначенная как “S→J” на рис. 4.6, показывает символически S→J переход. Как отмечалось выше, S→J переход происходит только тогда, когда локальное возмущение с амплитудой, превышающей критическую амплитуду для S→J перехода, возникает в метастабильных относительно S→J перехода состояниях синхронизованного потока

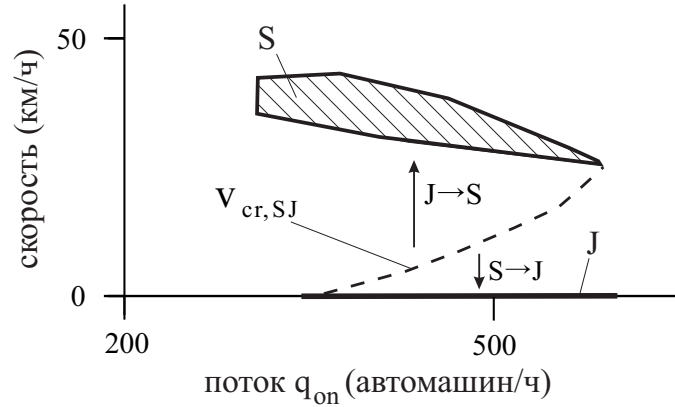


Рис. 4.6: Численное моделирование Z -характеристики для прямого $S \rightarrow J$ и обратного $J \rightarrow S$ фазовых переходов, выполненное с помощью стохастической микроскопической трехфазной модели Главы 3 [148]: Z -характеристика как функция потока во въезд q_{on} при постоянном потоке по основной дороге $q_{in} = 1850$ автомашин/ч. S – фаза синхронизованного потока, J – фаза широкого движущегося кластера. Стрелки $S \rightarrow J$ и $J \rightarrow S$ иллюстрируют символически прямой и обратный переходы между фазами S и J соответственно. Пунктирная кривая показывает зависящую от потока среднюю (макроскопическую) скорость $v_{cr, SJ}$ внутри критического возмущения, требуемого для $S \rightarrow J$ перехода.

4.2.2. Численное моделирование последовательности $F \rightarrow S \rightarrow J$ переходов

Результаты численного моделирования показывают, что Z -характеристика для перехода от свободного к плотному потоку ($F \rightarrow S$ переход) вместе с Z -характеристикой для $S \rightarrow J$ перехода образуют $2Z$ -характеристику для фазовых переходов в транспортном потоке (рис. 4.7).

Следует подчеркнуть, что сумма $q_{in} + q_{on}$ равна величине потока $q_{sum} = q_{in} + q_{on}$ в свободном потоке после узкого места из-за въезда на автодорогу. Поэтому Z -характеристика для перехода от свободному к плотному потоку может рассматриваться как функция суммарного потока q_{sum} . В таком случае на Z -характеристике могут быть показаны минимальная пропускная способность C_{min} и максимальная C_{max} пропускная способность для свободного потока на узком месте автодороги. Однако, если фаза синхронизованного потока существует перед узким местом, то в общем случае поток после узкого места уже не равен сумме $q_{in} + q_{on}$. По этой причине,

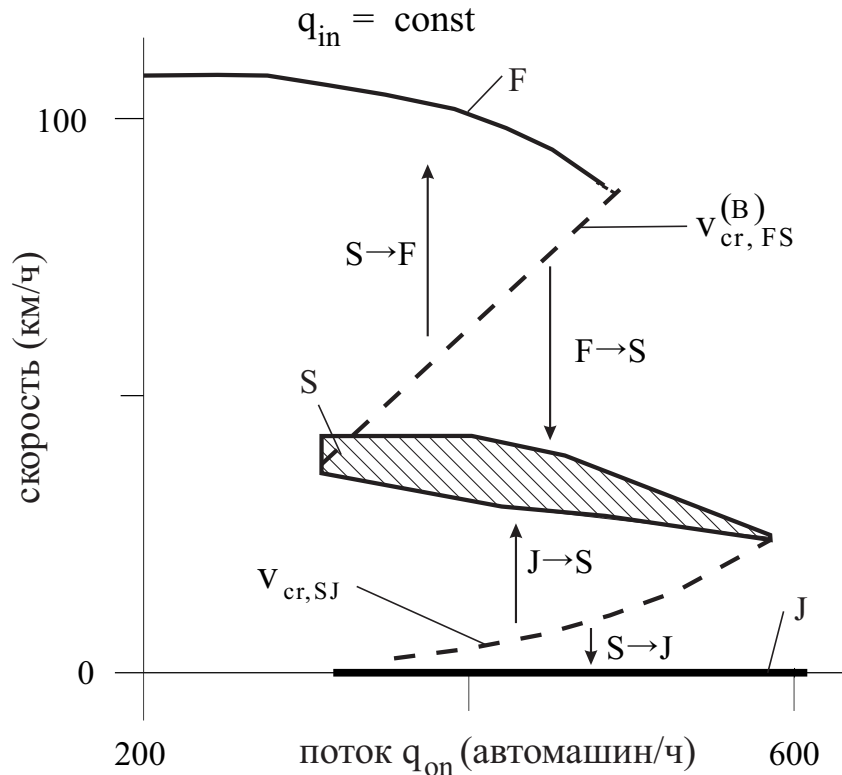


Рис. 4.7: Численное моделирование $2Z$ -характеристики для фазовых переходов в транспортном потоке, выполненное с помощью стохастической микроскопической трехфазной модели Главы 3: $2Z$ -характеристика для фазовых переходов в транспортном потоке как функция потока во въезд q_{on} при постоянном потоке по основной дороге $q_{in} = 1850$ автомашин/ч. Первая Z -характеристика для переходов между фазами F и S та же самая, что и показанная на рис. 4.1. Вторая Z -характеристика для переходов между фазами S и J та же самая, что и показанная на рис. 4.6. F – фаза свободного потока, S – фаза синхронизованного потока, J – фаза широкого движущегося кластера. Стрелки $F \rightarrow S$, $S \rightarrow F$, $S \rightarrow J$, и $J \rightarrow S$ иллюстрируют символически соответствующие переходы между всеми тремя фазами транспортного потока.

Z-характеристика для $S \rightarrow J$ и $J \rightarrow S$ фазовых переходов (рис. 4.6), а также 2Z-характеристика (рис. 4.7), рассматриваются как функции потока q_{on} при заданном потоке q_{in} .

Первая Z-характеристика для переходов между фазами F и S та же самая, что и показанная на рис. 4.1. Вторая Z-характеристика для переходов между фазами S и J та же самая, что и показанная на рис. 4.6.

Таким образом, можно сделать вывод, что 2Z-характеристика для фазовых переходов в транспортном потоке показывает следующие характерные свойства:

- (i) 2Z-характеристика для фазовых переходов в транспортном потоке состоит из двух различных Z-характеристик:
 - Первая Z-характеристика описывает для переходы между состояниями транспортного потока в фазах F и S на рис. 4.7. Это та же самая Z-характеристика, что и показанная на рис. 4.1.
 - Вторая Z-характеристика отвечает переходам между состояниями транспортного потока в фазах S и J на рис. 4.7. Это та же самая Z-характеристика, что и показанная на рис. 4.6.
- (ii) Существует конечный диапазон потоков, в пределах которого возможен каждый из $F \rightarrow S$, $S \rightarrow F$, $S \rightarrow J$ и $J \rightarrow S$ фазовых переходов.
- (iii) каждый из $F \rightarrow S$, $S \rightarrow F$, $S \rightarrow J$ и $J \rightarrow S$ фазовых переходов показывает метастабильную природу: малые локальные возмущения в исходной фазе транспортного потока затухают, т.е., никакого фазового перехода не происходит, в то время как локальные возмущения конечной амплитуды, равной или превышающей критическую амплитуду, действительно вызывают фазовый переход. Как уже упоминалось, такое локальное возмущение называется зародышем для фазового перехода.

В численных экспериментах по моделированию последовательности $F \rightarrow S \rightarrow J$ переходов (рис. 4.8) было найдено, что после случайного времени задержки $T^{(B)}$ (§ 4.1.1) спонтанный $F \rightarrow S$ переход происходит на узком

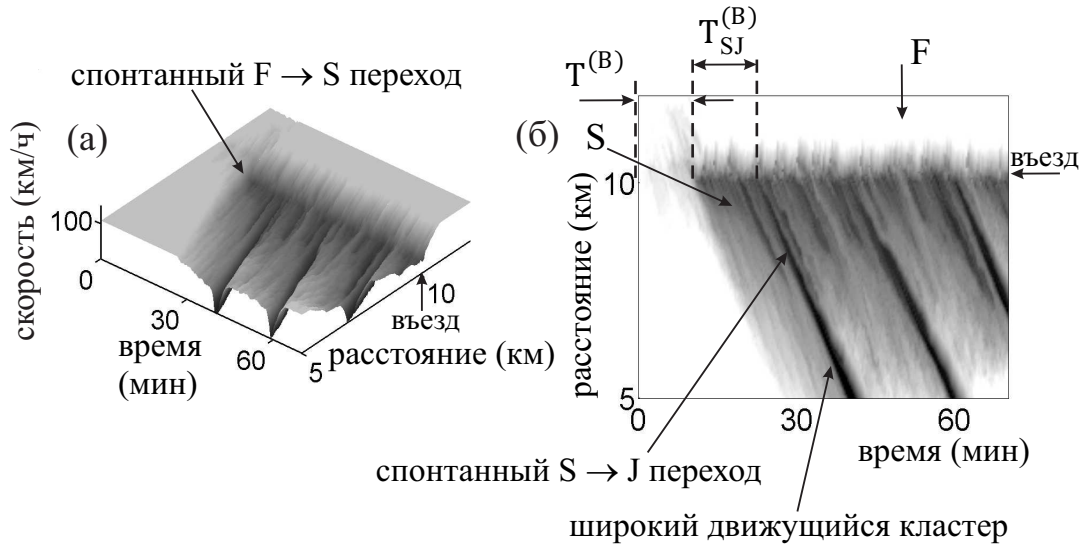


Рис. 4.8: Численное моделирование последовательности $F \rightarrow S \rightarrow J$ переходов, выполненное с помощью стохастической микроскопической трехфазной модели. $q_{in} = 2100$ автомашин/ч и $q_{on} = 280$ автомашин/ч.

месте автодороги. В результате этого перехода, перед узким местом возникает фаза синхронизованного потока (рис. 4.8). Задний (по течению) фронт этого синхронизованного потока фиксирован на узком месте. Напротив, передний (по течению) фронт синхронизованного потока распространяется против потока. Внутри синхронизованного потока на некотором расстоянии от узкого места после другого случайного времени задержки $T_{SJ}^{(B)}$ происходит спонтанный $S \rightarrow J$ переход. В результате этого $S \rightarrow J$ перехода образуется широкий движущийся кластер (рис. 4.8).

4.3. Пространственно-временные структуры плотного потока на изолированном узком месте автодороги

4.3.1. Диаграмма пространственно-временных структур плотного потока на узком месте из-за въезда на автодорогу. Структуры синхронизованного потока

В результате численного моделирования была получена диаграмма различных структур плотного потока в рамках теории трех фаз (рис. 4.9). Диаграмма показывает области *спонтанного* возникновения структур плотного потока в плоскости поток–поток, в которой координатами являются потоки q_{in} и q_{on} . Различные структуры синхронизованного потока (SP) (рис. 4.9 (в–д) и 4.10) возникают между границами $F_S^{(B)}$ и $S_J^{(B)}$ на рис. 4.9 (а). Границы $F_S^{(B)}$ и $S_J^{(B)}$ относятся соответственно к *спонтанным* $F \rightarrow S$ и $S \rightarrow J$ переходам.

4.3.1.1. Расширяющаяся структура синхронизованного потока (Widening synchronized flow pattern, WSP)

Задний по течению фронт расширяющейся структуры синхронизованного потока (WSP) фиксирован на узком месте из-за въезда на автодорогу (рис. 4.9 (в)). Передний по течению фронт WSP непрерывно перемещается навстречу потоку. WSP возникает выше границы W на рис. 4.9 (а).

4.3.1.2. Локализованная структура синхронизованного потока (Localized synchronized flow pattern, LSP)

Ниже границы W возникает локализованная структура синхронизованного потока (LSP). Как и в случае с WSP, задний по течению фронт LSP фиксирован на узком месте из-за въезда на автодорогу (рис. 4.9 (г)). Однако, в отличие от WSP, передний по течению фронт LSP локализован на

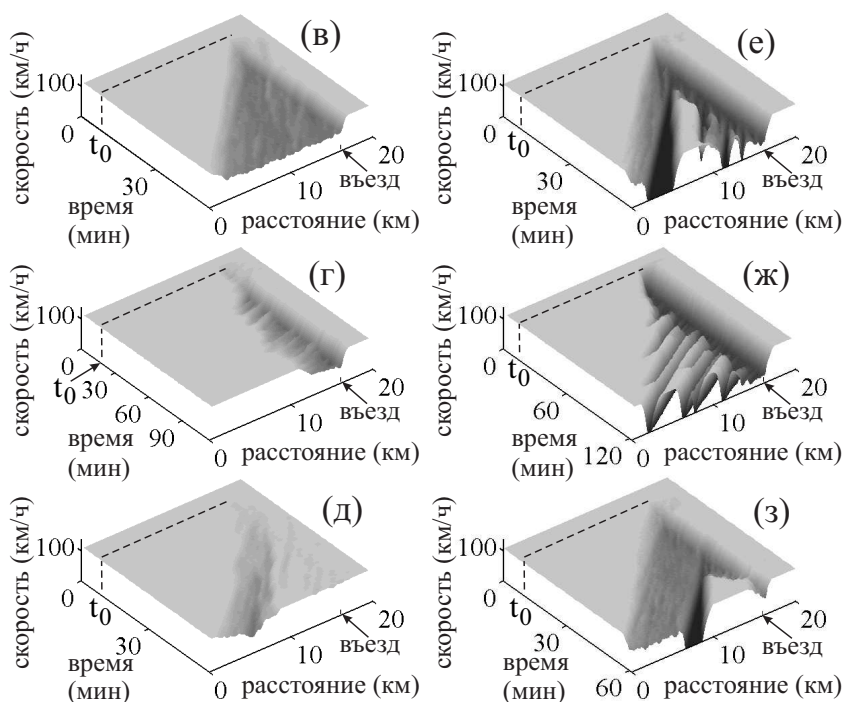
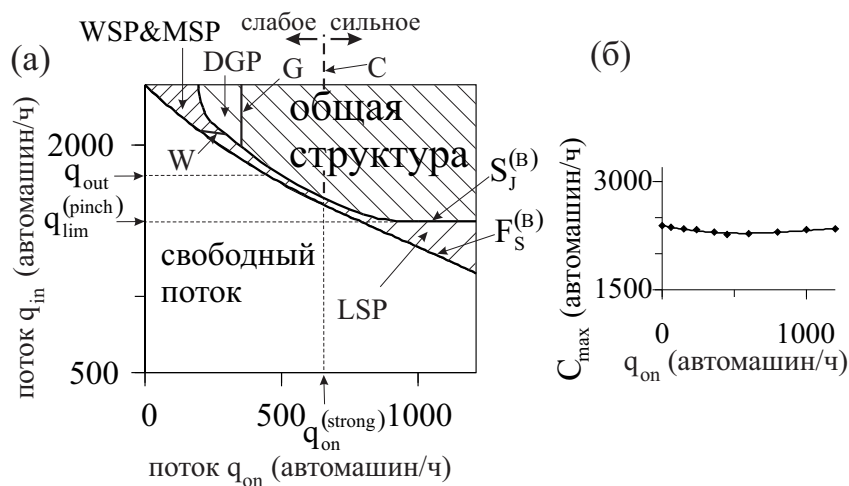


Рис. 4.9: Диаграмма пространственно-временных структур плотного потока на изолированном узком месте из-за въезда на автодорогу (а), пропускная способность в свободном потоке на узком месте (б) и структуры плотного потока (в-з), относящиеся к (а): (в - д) - структуры синхронизованного потока (SP) и (е - з) - общая структура плотного потока (GP), (в) - расширяющаяся SP (WSP), (г) - локализованная SP (LSP), (д) - движущаяся SP (MSP), (е) - GP при $q_{in} > q_{out}$, (ж) - GP при $q_{in} < q_{out}$, (з) - разделяющаяся GP (DGP). В (в-з) использованы следующие значения потоков (q_{on} , q_{in}): (в) (260, 2280), (г) (310, 1945), (д) (35, 2307), (е) (500, 2250), (ж) (1200, 1658), и (з) (250, 2250) автомобилей/ч. $q_{max,lim}^{(B)} \approx 2400$ автомобилей/ч. Поток во въезд на автодорогу включался при $t = t_0 = 8$ мин.

некотором расстоянии L_{LSP} от въезда на автодорогу (рис. 4.9 (г)).

4.3.1.3. Движущаяся структура синхронизованного потока (Moving synchronized flow pattern, MSP)

При высоких значениях потока по основной дороге q_{in} и низких значениях потока во въезд q_{on} вместо WSP возникает движущаяся структура синхронизованного потока (MSP) (рис. 4.9 (д)). Для всех типов SP было найдено, что величина потока внутри синхронизованного потока часто лишь незначительно меньше, чем в свободном потоке (рис. 4.10 (а, б, д), справа).

4.3.2. Общая пространственно-временная структура плотного потока (General Pattern, GP)

На диаграмме (рис. 4.9 (а)) справа от границы G и справа от границы $S_J^{(B)}$ возникает общая пространственно-временная структура плотного потока (GP), в которой непрерывно существует так называемая область сжатия синхронизованного потока (“pinch region”) и появляется последовательность широких движущихся кластеров (рис. 4.9 (е, ж)). Справа от границы $S_J^{(B)}$ и слева от границы G возникает разделяющаяся GP (DGP) (рис. 4.9 (з)).

Было установлено, что GP и DGP имеют следующие свойства:

(i) В области сжатия синхронизованного потока внутри GP спонтанно возникают и нарастают узкие движущиеся кластеры (рис. 4.11 (а, б), $x = 15.8$ км и $x = 14.5$ км). В соответствии с теорией трех фаз [114], на плоскости поток–плотность точки, относящиеся к состояниям внутри области сжатия синхронизованного потока, лежат выше линии J (рис. 4.11 (в)). Некоторые узкие движущиеся кластеры затем становятся широкими движущимися кластерами. После трансформации узкого движущегося кластера в широкий, такой кластер подавляет нарастание узких движущихся кластеров за собой в некоторой области ниже по течению (рис. 4.11 (а), $x = 13$ км). В этом случае среднее временное расстояние T_J между узкими движущимися кластерами, возникающими в области сжатия синхронизо-

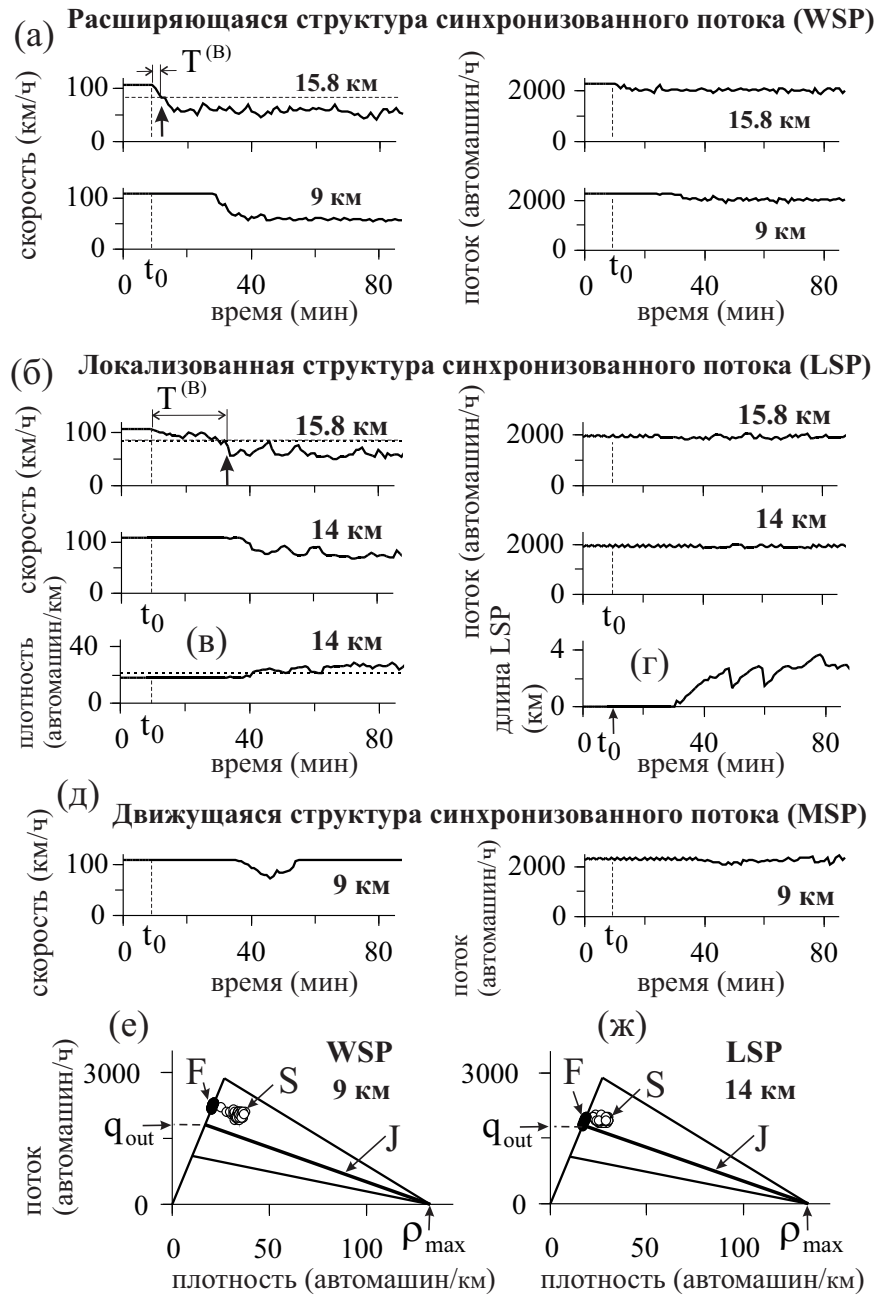


Рис. 4.10: Пространственно-временные структуры синхронизованного потока (SP): (а, б, д) – скорость (слева) и величина потока (справа) в SP, показанных соответственно на рис. 4.9 (в-д), (а) - WSP, (б) - LSP, (в) - плотность внутри LSP как функция времени, (г) - длина LSP как функция времени, (д) - MSP. Данные на плоскости поток–плотность на (е) показаны для WSP (а) и на (ж) для LSP (б). Пунктирная линия на (в) относится к плотности $\rho_{\max}^{(\text{free})} \approx 22.5$ автомашин/км. $t_0 = 8$ мин.

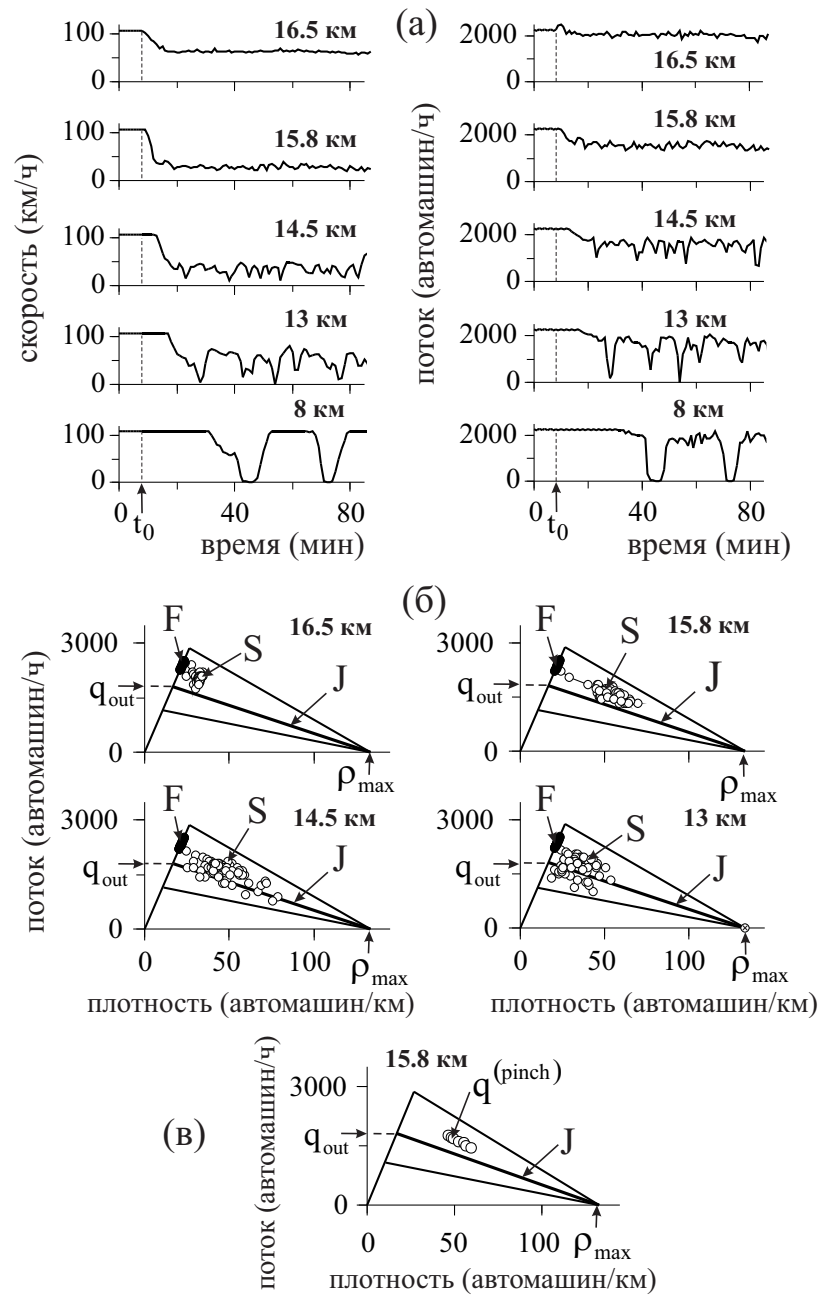


Рис. 4.11: Общая пространственно-временная структура плотного потока: (а) - скорость (слева) и величина потока (справа), (б) - соответствующие данные на плоскости поток–плотность для GP, показанной на рис. 4.9 (е), (в) - точки на плоскости поток–плотность, относящиеся к области сжатия синхронизованного потока внутри GP. На (а, б) - усредненные за 1 мин данные виртуальных детекторов. На (б) черные точки и кружки относятся соответственно к свободному потоку (F) и к синхронизованному потоку (S). С помощью символа \otimes обозначены данные, относящиеся к движущимся кластерам. $t_0 = 8$ мин.

ванного потока, заметно меньше, чем среднее временное расстояние $T_J^{(\text{wide})}$ между широкими движущимися кластерами (на рис. 4.11 (а), $T_J \approx 6$ мин при $x = 14.5$ км и $T_J^{(\text{wide})} \approx 30$ мин при $x = 8$ км). Однако, эффект подавления узких движущихся кластеров происходит только тогда, когда они достаточно близки к появившемуся широкому движущемуся кластеру.

(ii) Таким образом, когда расстояние R_{narrow} между узкими движущимися кластерами, возникающими в области сжатия синхронизованного потока, достаточно мало, и соответственно частота возникновения f_{narrow} узких движущихся кластеров, достаточно большая (при выбранных параметрах моделирования $R_{\text{narrow}} < 2.5$ км и соответствующая частота $f_{\text{narrow}} > 0.1$ мин⁻¹), только некоторые из первоначально возникших узких движущихся кластеров трансформируются в широкие движущиеся кластеры. Остальные узкие движущиеся кластеры исчезают или сливаются с другими узкими движущимися кластерами. Напротив, если расстояние R_{narrow} достаточно велико, и, соответственно, частота возникновения f_{narrow} мала, то почти каждый из узких движущихся кластеров со временем становится широким движущимся кластером (рис. 4.12 (а)).

(iii) В DGP после того, как формируется широкий движущийся кластер, этот широкий движущийся кластер подавляет область сжатия синхронизованного потока внутри первоначальной GP. В результате, либо свободный поток, либо LSP появляется на узком месте, в то время как широкий движущийся кластер движется против потока, удаляясь от узкого места (рис. 4.9 (з)). Заметим, что в отличие от [147], граница G на диаграмме (рис. 4.9 (а)) не пересекает границу $S_J^{(B)}$ в точке $q_{\text{in}} = q_{\text{out}}$. Это связано с эффектом гистерезиса при образовании GP (§ 4.4).

(iv) Если $q_{\text{in}} > q_{\text{out}}$, то ширина первого в последовательности широких движущихся кластеров в GP непрерывно увеличивается со временем (рис. 4.9 (д)). Напротив, если $q_{\text{in}} < q_{\text{out}}$, самый дальний от узкого места широкий движущийся кластер в GP непрерывно уменьшается по ширине и исчезает, затем этот процесс повторяется для следующего широкого движущегося кластера, и т.д. (на рис. 4.9 (ж) видно последовательное исчезновение трех первых широких движущихся кластеров). Однако, даже при $q_{\text{in}} < q_{\text{out}}$, область, занимаемая широкими движущимися кластерами в GP,

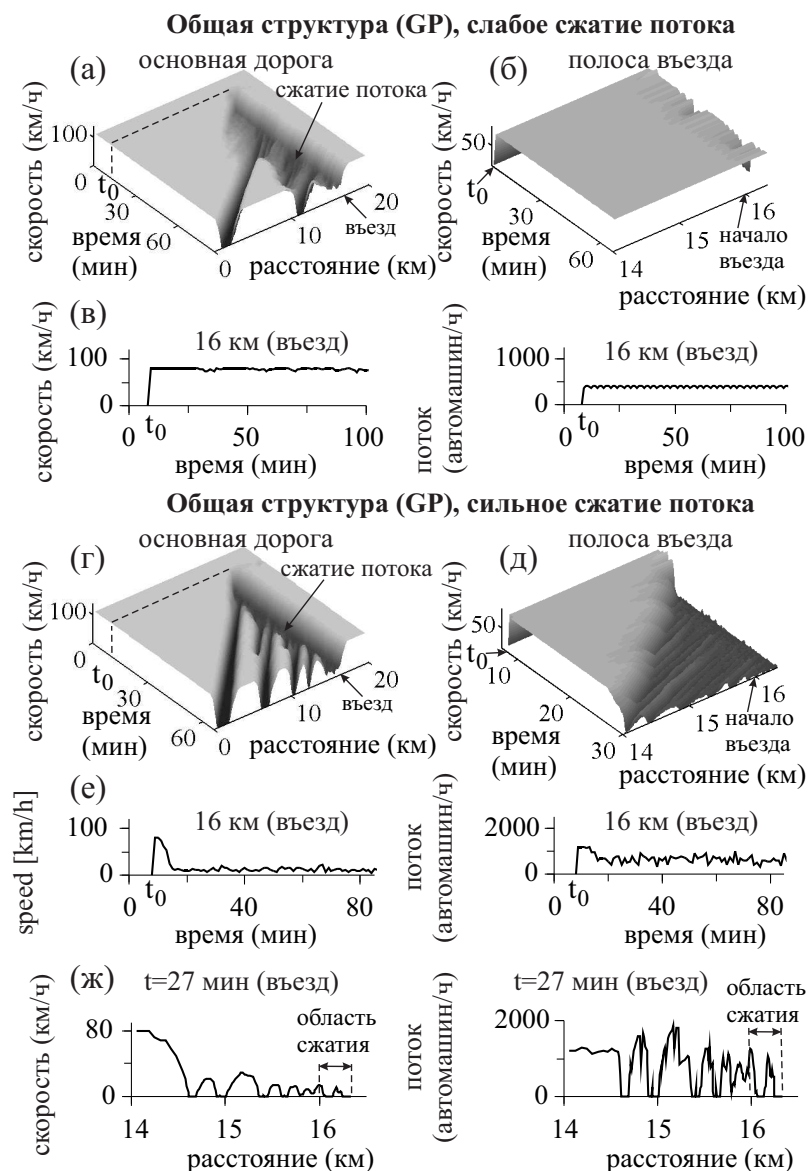


Рис. 4.12: Слабое и сильное сжатие синхронизованного потока в GP, возникшей на узком месте из-за въезда на автодорогу: (а, б) - скорость в пространстве и времени внутри GP в случае слабого сжатия синхронизованного потока на основной дороге (а) и на полосе въезда (б), (в) - скорость автомашин (слева) и величина потока (справа), относящиеся к (б), (г, д) - скорость в пространстве и времени внутри GP в случае сильного сжатия синхронизованного потока на основной дороге (г) и на полосе въезда (д), (е) - скорость автомашин (слева) и величина потока (справа), относящиеся к (д), (ж) -распределения в пространстве скорости автомашин (слева) и величины потока (справа) вдоль полосы въезда в фиксированный момент времени $t = 27$ мин, относящиеся к (д). $t_0 = 8$ мин. $q_{in} = 2000$ автомашин/ч, q_{on} имел следующие значения: 400 (а-в), 1200 (г-ж) автомашин/ч.

непрерывно расширяется со временем в направлении против течения.

(v) В большинстве случаев, GP состоит из области сжатия синхронизованного потока и области широких движущихся кластеров. Соответственно, ширина области синхронизованного потока L_{syn} в GP равна расстоянию от заднего (по течению фронта) синхронизованного потока (расположенного на узком месте автодороги) до передней (по течению) границы области сжатия синхронизованного потока. Ширина области синхронизованного потока L_{syn} в GP остается ограниченной с течением времени.

(vi) Однако, в некоторых случаях ширина области синхронизованного потока L_{syn} в GP может непрерывно увеличиваться с течением времени. Это происходит выше границы W на рис. 4.9 (a), при больших значениях потока во въезд q_{on} : сначала возникает WSP, а уже затем или возникает DGP, или же формируется GP. В этих случаях, область сжатия синхронизованного потока и возникновение движущихся кластеров происходит внутри первоначальной WSP. При этом может оказаться, что передний по течению фронт первоначальной WSP движется против потока быстрее, чем передний по течению фронт широкого движущегося кластера (рис. 4.9 (e)). Тогда, передний по течению фронт всей GP является передним фронтом первоначальной WSP, а не передним фронтом широкого движущегося кластера.

4.3.3. Эволюция пространственно-временных структур плотного потока, возникающих на узком месте из-за въезда на автодорогу

Для проведения численного эксперимента по моделированию эволюции пространственно-временных структур плотного потока, возникающих на узком месте из-за въезда на автодорогу, использовались эмпирические данные для потоков во въезд $q_{\text{on}}(t)$ и в достаточно удаленной от въезда точке на основной дороге $q_{\text{in}}(t)$, взятые из книги [122] (рис. 4.13 (a)). В соответствии с [122], было найдено, что по мере увеличения $q_{\text{on}}(t)$ и $q_{\text{in}}(t)$ сначала в момент времени $t = 6 : 12$ спонтанным образом происходил $F \rightarrow S$ переход

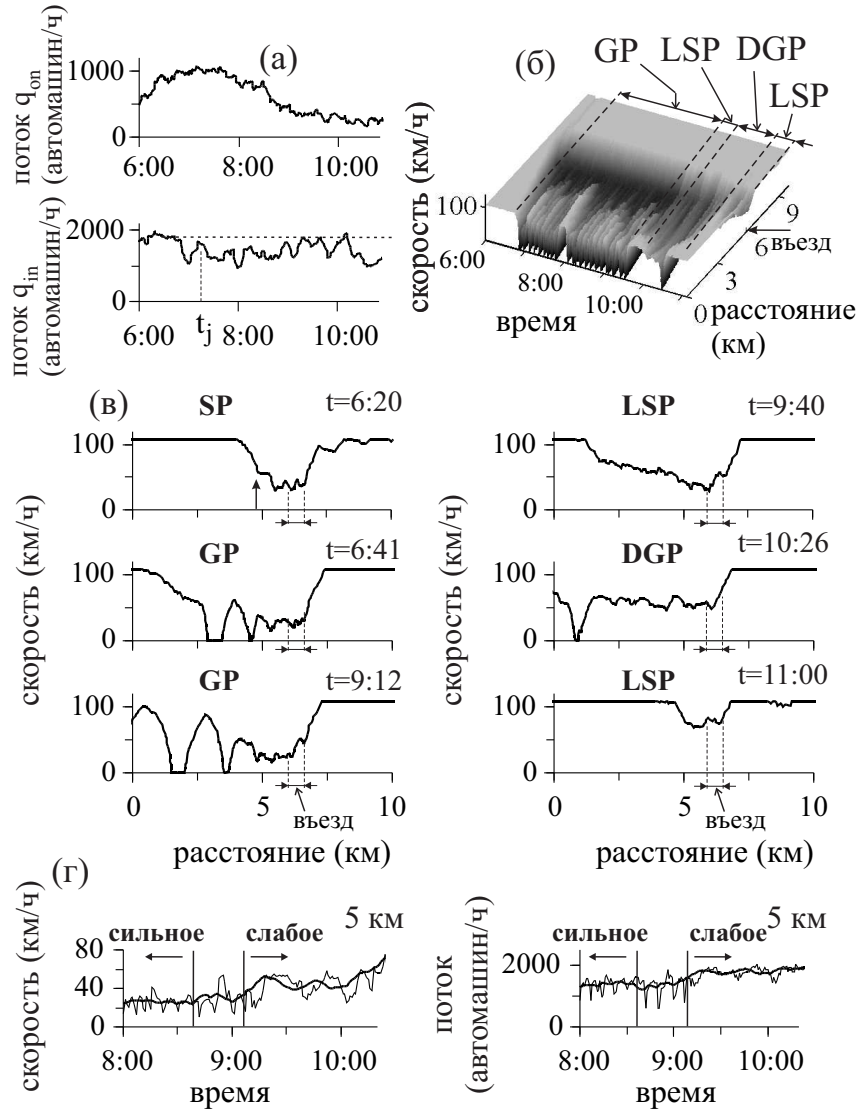


Рис. 4.13: Эволюция пространственно-временных структур плотного потока, возникающих на узком месте из-за въезда на автодорогу: (а) - $q_{on}(t)$ (вверху) и $q_{in}(t)$ (внизу), относящиеся соответственно к эффективному потоку во въезд *'eff-on'* и к величине потока на основной дороге на детекторе D1, взятые из эмпирических данных рис. 12 из книги [122] (эти эмпирические данные были умножены на численные коэффициенты 0.67 для q_{on} и 0.42 для q_{in}), (б) - эволюция структур плотного потока, (в) - распределения скорости, (г) - скорость (слева) и величина потока (справа) на виртуальном детекторе в области сжатия синхронизованного потока внутри GP. t_j на (а) – момент времени, в который первый широкий движущийся кластер достигает детектора D1 в эмпирических данных на рис. 12 книги [122]. В момент времени $t \geq t_j$ величина потока q_{in} выбирается равной $q_{in} = q_{in}(t_j)$. На (г) представлены данные, усредненные за 1 мин (тонкие линии) и за 10 мин (толстые линии). Параметры модели въезда на автодорогу (рис. 2.6 (а)) следующие: $x_{on} = 6$ км, $L_m = 600$ м, $L_r = 300$ м.

на узком месте из-за въезда, и затем возникал синхронизованный поток, который распространялся против течения от узкого места (рис. 4.13 (б) и (в) при $t = 6 : 20$). В дальнейшем, поскольку поток $q_{\text{он}}(t)$ быстро возрастал (рис. 4.13 (а)), происходило формирование области сжатия синхронизованного потока, что приводило к возникновению GP в момент $t = 6 : 36$ (рис. 4.13 (б)). Максимум потока $q_{\text{он}}(t)$ заметно превосходил поток $q_{\text{он}}^{(\text{strong})}$, необходимый для сильного сжатия синхронизованного потока. Поэтому, как и в эмпирических данных (рис. 11 в книге [122]), в численном эксперименте реализовалась GP с сильным сжатием синхронизованного потока, в котором происходило частое рождение движущихся кластеров.

С течением времени поток во въезд $q_{\text{он}}$ начинал уменьшаться (рис. 4.13 (а)). Как и на эмпирическом рис. 18 (а) [122], происходил переход к слабому сжатию синхронизованного потока в GP (рис. 4.13 (г)). По мере дальнейшего уменьшения $q_{\text{он}}$ (рис. 4.13 (а)), GP трансформировалась в LSP в момент времени $t = 9 : 30$ (рис. 4.13 (б)), также как и в эмпирических данных (рис. 19 (а) (слева) в [122]). Скорость автомашин внутри LSP выше, чем в синхронизованном потоке внутри GP. В течении дальнейшей эволюции синхронизованного потока в LSP опять возникала область сжатия синхронизованного потока, в которой возникал широкий движущийся кластер: в момент времени $t = 10 : 15$ LSP трансформировалась в DGP (рис. 4.13 (б, в)). Как и в эмпирических данных (рис. 19 в [122]), этот эффект сжатия синхронизованного потока происходил на некотором расстоянии (около 3 км) вверх по течению от въезда. После того, как широкий движущийся кластер в DGP удалялся достаточно далеко от въезда, при $t > 10 : 35$ опять возникала LSP. При дальнейшем уменьшении $q_{\text{он}}$ LSP исчезала и вблизи въезда восстанавливался свободный поток.

4.4. Гистерезис и эффекты метастабильности для пространственно-временных структур плотного потока, возникающих на узком месте из-за въезда на автодорогу

4.4.1. Порог возникновения структур синхронизованного потока

Граница $F_S^{(B)}$ (рис. 4.9 (а)) соответствует спонтанному $F \rightarrow S$ переходу, который происходит на узком месте в течении заданного времени наблюдения ($T_{\text{об}} = 30$ мин) с вероятностью $P_{FS} \approx 1$. Слева от $F_S^{(B)}$, т.е., в свободном потоке, спонтанный $F \rightarrow S$ переход может тем не менее произойти с вероятностью $P_{FS} < 1$ [175].

Этот результат объясняется Z -характеристикой на рис. 4.1. Для заданного значения $q_{\text{in}} < q_{\text{th}}$ пороговая величина потока во въезд $q_{\text{on}}^{(\text{th})}$ на этой Z -характеристике относится к границе $F_{\text{th}}^{(B)}$ области метастабильности на рис. 4.14 (а). По мере приближения к границе $F_{\text{th}}^{(B)}$ вероятность $F \rightarrow S$ перехода $P_{FS} \rightarrow 0$. Таким образом, слева от границы $F_{\text{th}}^{(B)}$ на плоскости $(q_{\text{on}}, q_{\text{in}})$ структура синхронизованного потока (SP) не может существовать в течении длительного времени. Между границами $F_{\text{th}}^{(B)}$ и $F_S^{(B)}$ (заштрихованная область на рис. 4.14 (а)) в зависимости от начальных условий может существовать либо свободный поток, либо одна из SP: эта область на диаграмме является областью метастабильности свободного потока относительно $F \rightarrow S$ перехода и образования синхронизованного потока.

SP может затем существовать в течение долгого времени (более 50 мин). В некоторых случаях, в зависимости от q_{on} и q_{in} , SP либо исчезает, либо трансформируется в GP. Имеет место эффект гистерезиса, относящийся к метастабильным состояниям (рис. 4.15 (а, б)): После того, как SP сначала спонтанно возникает справа от границы $F_S^{(B)}$, в дальнейшем эта SP может продолжать существовать, когда один из потоков q_{on} или q_{in} (или оба сразу) уменьшаются и точка $(q_{\text{on}}, q_{\text{in}})$ смещается в область между границами $F_S^{(B)}$ и $F_{\text{th}}^{(B)}$. SP исчезает вблизи порога метастабильности $F_{\text{th}}^{(B)}$.

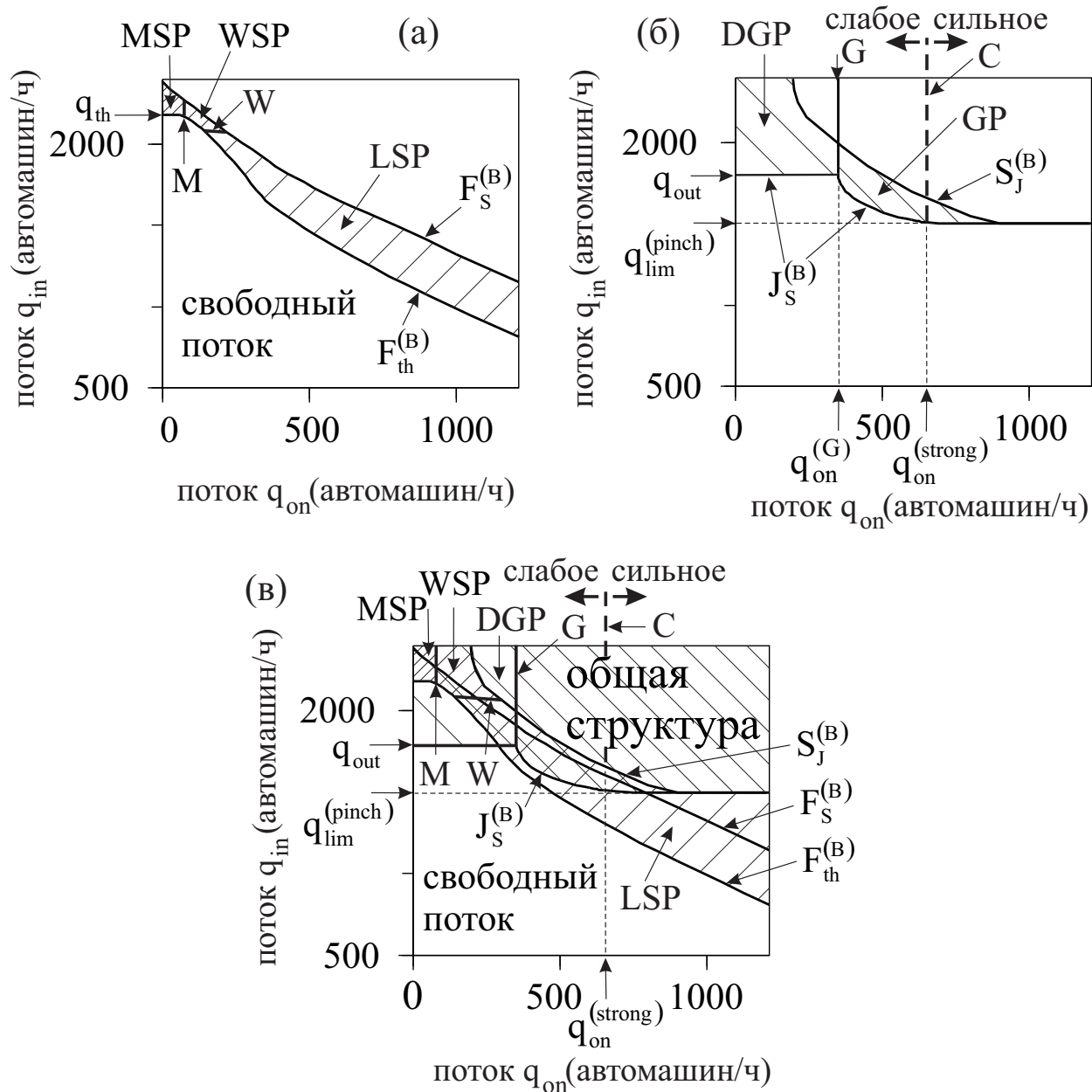


Рис. 4.14: Области метастабильности на диаграмме пространственно-временных структур плотного потока на узком месте из-за въезда на автодорогу: (а) - область метастабильности (заштрихованная область), в которой может существовать или быть индуцирован как свободный, так и синхронизованный поток; (б) - область метастабильности (заштрихованная область), в которой может существовать или быть индуцирована как GP (справа от линии G), так и DGP (слева от линии G); (в) - общая диаграмма, относящаяся к рис. 4.9 (а), на которой показаны области метастабильности из рис.(а) и (б).

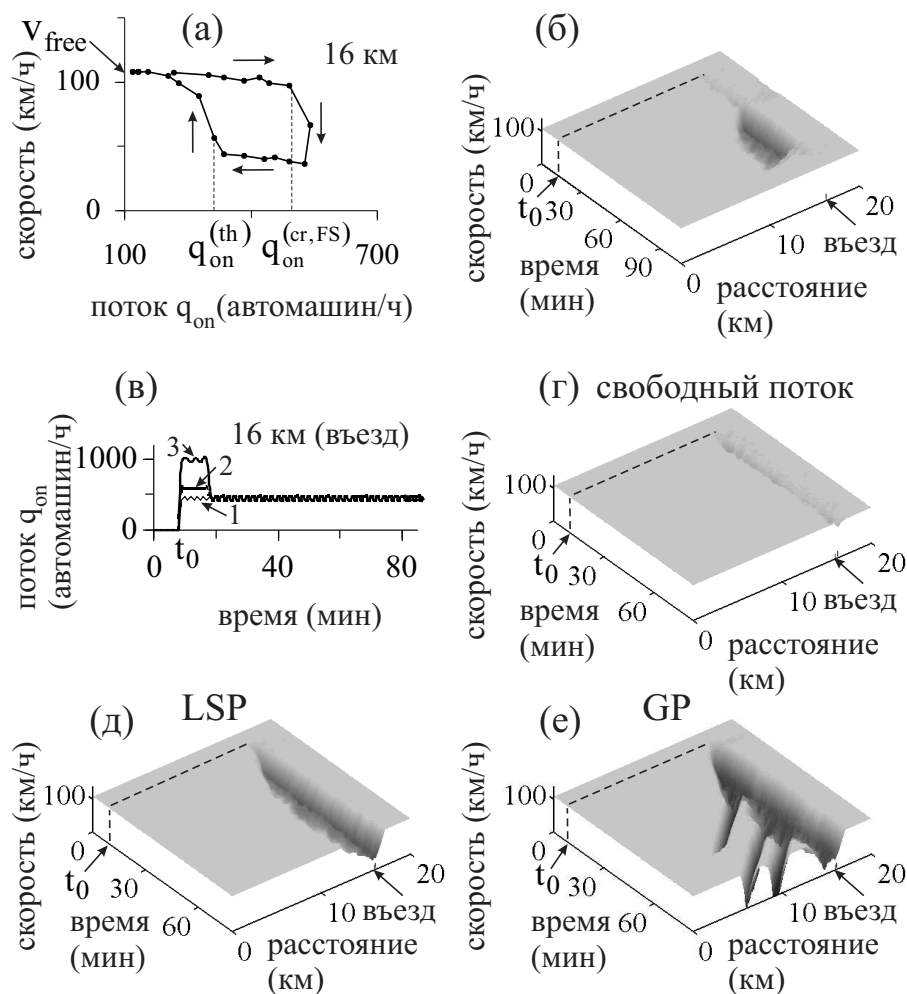


Рис. 4.15: Эффект гистерезиса (а, б) и множественная метастабильность (в - е) структур плотного потока на узком месте из-за въезда на автодорогу: (а, б) - усредненные (за 5 мин) данные для скорости на основной дороге, когда поток во въезд q_{on} сначала плавно увеличивается, а потом уменьшается, при фиксированном потоке $q_{in} = 1800$ автомашин/ч (а), и спонтанное возникновение и исчезновение соответствующей SP (б); (в) - кратковременное увеличение потока во въезд q_{on} , которое используется, чтобы индуцировать различные структуры плотного потока (множественная метастабильность); (г-е) - три различных структуры транспортного потока при одних и тех значениях потоков $q_{on} = 450$ автомашин/ч и $q_{in} = 1756$ автомашин/ч: свободный поток (г), LSP (д) и GP (е). Для структуры свободного потока (г) увеличение потока q_{on} (линия 1 на (в)) не применялась, для возбуждения LSP (линия 2 на (в)) и GP (линия 3 на (в)) поток q_{on} кратковременно увеличивался в течении 10 мин на 600 автомашин/ч для LSP (д) и на 1000 автомашин/ч для GP (е). Параметры модели въезда (рис. 2.6 (а)) следующие: $L_m = 500$ м, $L_r = 300$ м. Поток во въезд включался в момент времени $t = t_0 = 8$ мин.

В некотором диапазоне низких значений потока $q_{\text{он}}$, величина потока $q_{\text{ин}}$ на границе $F_{\text{th}}^{(\text{B})}$ остается почти постоянной: $q_{\text{ин}} \approx q_{\text{th}}$. На диаграмме структур плотного потока существует граница, обозначенная вертикальной линией M на рис. 4.14 (а), которая разделяет область существования MSP (слева от линии M) и WSP (справа от линии M). Слева от границы M и между границами $F_{\text{th}}^{(\text{B})}$ и $F_{\text{S}}^{(\text{B})}$, в исходном свободном потоке движущаяся структура синхронизованного потока (MSP) может либо возникнуть спонтанным образом (пункт (vii) в § 4.3.1), либо быть индуцированной применением кратковременного увеличением потока $q_{\text{он}}$. При низких значениях $q_{\text{он}}$ возникает одиночная MSP (рис. 4.9 (д)). Если поток $q_{\text{он}}$ возрастает и соответствующая точка на диаграмме приближается слева к границе M , то сначала может спонтанно возникнуть WSP. Однако, внутри этой WSP с течением времени спонтанно появляются локальные области свободного потока, которые в итоге чередуются с областями синхронизованного потока. Такая структура из чередующихся областей свободного и синхронизованного потока (ASP) в дальнейшем трансформируется в последовательность MSP. В свою очередь, между границами $F_{\text{th}}^{(\text{B})}$ и $F_{\text{S}}^{(\text{B})}$ и справа от границы M (а также выше границы W) вместо MSP расширяющаяся структура синхронизованного потока (WSP) может быть индуцирована или же возникает спонтанно.

4.4.2. Порог возникновения общей структуры плотного потока

Эффект гистерезиса и метастабильные состояния имеют место также при возникновении общей структуры плотного потока (GP).

Этот результат объясняется Z-характеристикой на рис. 4.1. Для заданного значения $q_{\text{ин}} < q_{\text{th}}$ пороговая величина потока во въезд $q_{\text{он}}^{(\text{th})}$ на этой Z-характеристике относится к границе $F_{\text{th}}^{(\text{B})}$ области метастабильности на рис. 4.14 (а). По мере приближения к границе $F_{\text{th}}^{(\text{B})}$ вероятность F→S перехода $P_{\text{FS}} \rightarrow 0$. Таким образом, слева от границы $F_{\text{th}}^{(\text{B})}$ на плоскости $(q_{\text{он}}, q_{\text{ин}})$ структура синхронизованного потока (SP) не может существовать в течение длительного времени. Между границами $F_{\text{th}}^{(\text{B})}$ и $F_{\text{S}}^{(\text{B})}$ (заштрихованная

область на рис. 4.14 (а)) в зависимости от начальных условий может существовать либо свободный поток, либо одна из SP: эта область на диаграмме является областью метестабильности свободного потока относительно $F \rightarrow S$ перехода и образования синхронизованного потока.

В результате численных экспериментов было найдено:

(i) На границе $S_J^{(B)}$ $S \rightarrow J$ переход происходит в течении заданного интервала наблюдения ($T_{об} = 60$ мин на рис. 4.9 (а) и 4.14 (б)) с вероятностью $P_{SJ} \approx 1$. Однако, слева от границы $S_J^{(B)}$ $S \rightarrow J$ переход также может произойти с вероятностью $P_{SJ} < 1$. Этот результат связан в Z-образной характеристикой для $S \rightarrow J$ перехода (рис. 4.6). Для заданного значения $q_{in} < q_{out}$ пороговая величина потока во въезд $q_{on}^{(th, SJ)}$ на этой Z-характеристике относится к точке на диаграмме на границе области метастабильности $J_S^{(B)}$, для которой вероятность $P_{SJ} = 0$ (рис. 4.14 (б)). Между границами $S_J^{(B)}$ и $J_S^{(B)}$ (заштрихованная область на рис. 4.14 (б)) как свободный поток, так и синхронизованный поток, *метастабильны* относительно формирования GP, т.е., GP может либо возникнуть спонтанно с течением времени, либо быть индуцированной кратковременным возмущением.

(ii) Если GP возникла спонтанно справа от границы $S_J^{(B)}$, такая GP может существовать достаточно долго, даже если один из потоков q_{in} и q_{on} (или сразу оба) уменьшаются так, что соответствующая точка на диаграмме смещается в область между границами $S_J^{(B)}$ и $J_S^{(B)}$. Ниже и слева от границы $J_S^{(B)}$ GP исчезает.

(iii) Граница $J_S^{(B)}$ состоит из горизонтальной линии

$$q_{in} = q_{out} \text{ при } q_{on} \leq q_{on}^{(G)} \quad (4.2)$$

и кривой, определяемой условием

$$q_{in} = q^{(pinch)}(q_{on}) \text{ при } q_{on} > q_{on}^{(G)}. \quad (4.3)$$

Эти два участка границы $J_S^{(B)}$ сливаются в точке $q_{on} = q_{on}^{(G)}$. В этой точке граница $J_S^{(B)}$ пересекает границу G , которая разделяет области существования DGP и GP на диаграмме (рис. 4.14 (б)). Таким образом, между грани-

цами $J_S^{(B)}$ и $S_J^{(B)}$ и *слева* от линии G существуют метастабильные состояния свободного потока, в которых DGP может возникнуть спонтанно или быть индуцированной. В противоположность этому, область между границами $J_S^{(B)}$ и $S_J^{(B)}$ и *справа* от линии G является областью метастабильности относительно образования GP.

(iv) Чтобы объяснить вид границы $J_S^{(B)}$, заметим, что при $q_{on} < q_{on}^{(G)}$ область сжатия синхронизованного потока и, соответственно, GP не могут постоянно существовать. Однако, при $q_{in} > q_{out}$ существуют *одиночный движущийся широкий кластер* и, соответственно, DGP. Напротив, при $q_{in} < q_{out}$ одиночный движущийся широкий кластер не формируется и, соответственно, DGP не возникает. Это приводит к условию (4.2) для границы $J_S^{(B)}$ при $q_{on} < q_{on}^{(G)}$. При $q_{on} > q_{on}^{(G)}$ GP может существовать при условии, что входной поток q_{in} в эту структуру превышает $q^{(pinch)}$. Напротив, при $q_{in} < q^{(pinch)}$ область сжатия синхронизованного потока и, соответственно, GP исчезают. Таким образом, условие (4.3) действительно определяет границу $J_S^{(B)}$ при потоках $q_{on} \geq q_{on}^{(G)}$.

4.4.3. Пересечение областей метастабильности и множественное возбуждение структур плотного потока

Состояния свободного потока, метастабильные относительно образования структур синхронизованного потока (заштрихованная область на рис. 4.14 (а)), и состояния свободного потока, метастабильные относительно формирования общей структуры плотного потока (заштрихованная область на рис. 4.14 (б)), частично пересекаются с друг с другом (рис. 4.14 (с)). В области пересечения этих метастабильных состояний, в зависимости от начальных условий может существовать либо свободный поток, либо одна из структур синхронизованного потока (SP), либо общая структура плотного потока (GP или DGP).

На рис. 4.15 (в) на узком месте из-за въезда на автодорогу, в зависимости от амплитуды кратковременного импульса потока во въезд q_{on} , либо

сохраняется свободный поток (рис. 4.15 (г)), либо возникает локализованная структура синхронизованного потока (LSP) (рис. 4.15 (д)), либо индуцируется общая структура плотного потока (GP) (рис. 4.15 (е)). Однако устойчивость этих трех различных состояний транспортного потока вблизи узкого места существенно различна: в то время как свободный поток (рис. 4.15 (г)) и GP (рис. 4.15 (е)) сохраняются стабильными в течении 120 мин для 10 различных рассчитанных реализаций, LSP со временем самопроизвольно трансформируется в GP в 6 реализациях из 10.

4.5. Индуцированное образование структур плотного транспортного потока и “эффект захвата”

Если рассмотреть два отдельных пространственно разделенных узких места на автодороге, то структура плотного транспортного потока, которая первоначально возникает на узком месте, расположенном ниже по течению, может распространяться против потока и индуцировать переход от свободного к плотному транспортному потоку и дальнейшее образование структуры плотного потока на узком месте, расположенном выше по течению. В численном эксперименте, результаты которого приведены на рис. 4.16, изучался индуцированный переход от свободного к плотному потоку на автодороге с двумя узкими местами, возникающими из-за въезда на автодорогу. При этом узкое место, расположенное выше по течению, обозначалось как U и имело координату $x_{\text{on}} = x_{\text{on}}^{(\text{up})}$ и поток во въезд $q_{\text{on}} = q_{\text{on}}^{(\text{up})}$, а узкое место, расположенное ниже по течению, обозначалось как D и имело координату $x_{\text{on}} = x_{\text{on}}^{(\text{down})}$ и поток во въезд $q_{\text{on}} = q_{\text{on}}^{(\text{down})}$.

В численном эксперименте были найдены следующие эффекты:

(i) Широкий движущийся кластер индуцирует $F \rightarrow S$ переход и последующее образование структуры плотного потока на расположенном выше по течению узком месте. В этом случае, *независимо* от типа индуцированной структуры плотного потока, широкий движущийся кластер проходит мимо узкого места и движется дальше против потока, *сохраняя* неизменной

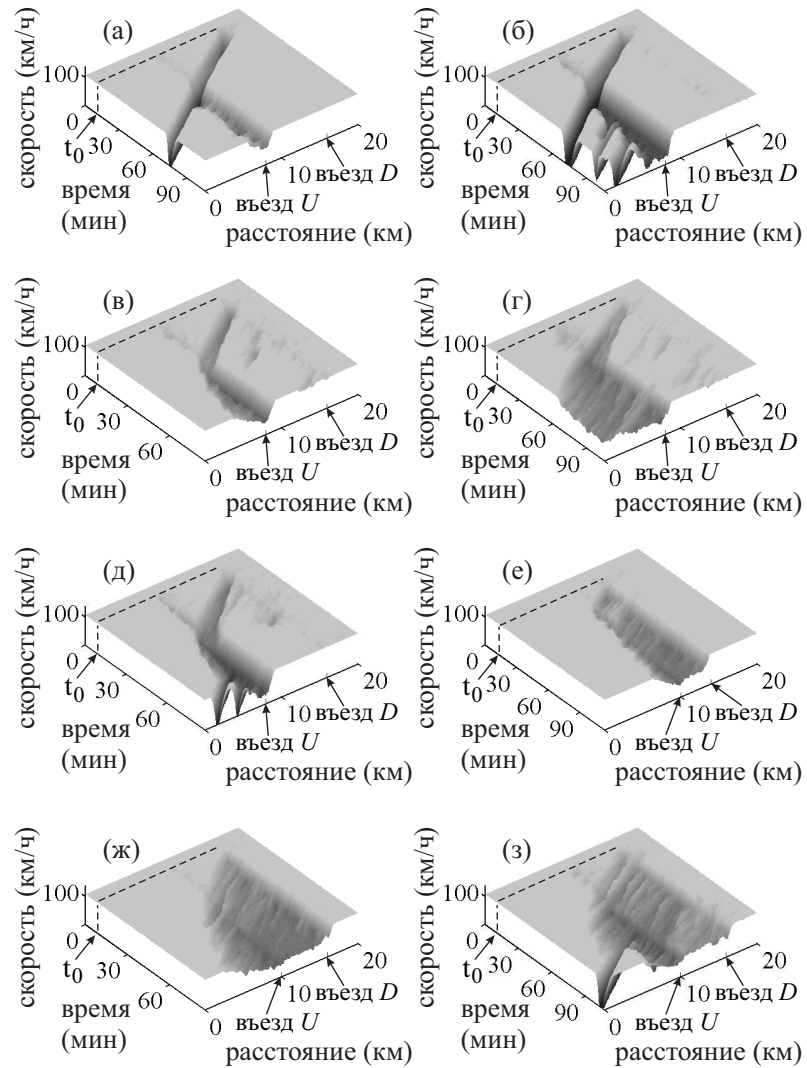


Рис. 4.16: Индуцированное образование структур плотного транспортного потока и эффект захвата (“catch effect”): (а, б) - широкий движущийся кластер индуцирует LSP (а) и GP (б), (в-д) - MSP индуцирует LSP (в), WSP (г) и GP (д), (е-з) - WSP индуцирует LSP (е), WSP (ж) и GP (з). Входные потоки во въезд U и в начале основной дороги вдали от въезда U ($q_{\text{on}}^{(\text{up})}$, q_{in}): (а) (320, 1800), (б) (450, 1756), (в) (400, 1800), (г) (200, 2118), (д) (440, 1800), (е) (300, 1756), (ж) (150, 2034), и (з) (240, 2000) автомобилей/ч. На (а-д) поток во въезд D $q_{\text{on}}^{(\text{down})} = 60$ автомобилей/ч. На (е-з) $q_{\text{on}}^{(\text{down})}$ равен 170 (е, ж) и 180 (з) автомобилей/ч. На (а-з) координаты въездов U и D ($x_{\text{on}}^{(\text{up})}$, $x_{\text{on}}^{(\text{down})}$) соответственно равны: (а-д) (8, 16), (е) (10, 14), и (ж, з) (10, 16) км. На (а-д) широкий движущийся кластер и MSP на въезде D возбуждались кратковременным увеличением потока $q_{\text{on}}^{(\text{down})}$. $L_r = 300$ м для обоих въездов, L_m равно 500 м для въезда U и 300 м для въезда D . Потоки во въезды включались при $t = t_0 = 8$ мин.

среднюю скорость заднего по потоку фронта v_g . На рис. 4.16 (а,б), широкий движущийся кластер возбуждается на въезде D , в то время как вблизи въезда U сохраняется свободный поток. Затем, этот широкий движущийся кластер, когда проходит через узкое место из-за въезда U , в зависимости от величины потока $q_{\text{оп}}^{(\text{up})}$ вызывает либо образование локализованной структуры плотного потока (LSP) (рис. 4.16 (а)), либо образование общей структуры плотного потока (GP) (рис. 4.16 (б)). В дальнейшем широкий движущийся кластер отделяется от индуцированной им структуры плотного потока и движется дальше против потока, поддерживая постоянной среднюю скорость заднего по потоку фронта v_g (см. для сравнения эмпирический пример на рис. 2 (б) в [122]). После того как широкий движущийся кластер оказывается выше по течению далеко от въезда U , выходной поток q_{out} из широкого движущегося кластера играет роль входного потока по основной дороге q_{in} . В этом случае, при выбранных параметрах модели, только LSP или GP могут возникать на узком месте вблизи въезда U (рис. 4.16 (а,б)), а WSP и MSP не образуются (рис. 4.9 (а)).

(ii) F→S переход и последующее образование структуры плотного потока на расположенном выше по течению узком месте индуцируется структурой синхронизованного потока (SP). В отличие от случая (i), эта SP (или ее задний по потоку фронт) *независимо* от типа индуцированной ей структуры плотного потока захватывается на узком месте и не распространяется дальше вверх по течению. Согласно [122], этот эффект называется эффектом захвата (“catch effect”). На рис. 4.16 (б), движущаяся структура синхронизованного потока (MSP), которая возникает на узком месте из-за въезда D , сначала движется против потока. На узком месте U эта MSP вызывает индуцированный F→S переход. После этого MSP *не* проходит мимо узкого места U , а захватывается на нем, и вместо MSP возникает локализованная структура синхронизованного потока (LSP) на узком месте U (см. эмпирический пример на рис. 6 (а) в [122]). Два другие примера эффекта захвата показаны на рис. 4.16 (г, д): исходная MSP захватывается на узком месте U в обоих случаях. Вместо этой MSP либо WSP (рис. 4.16 (г)), либо GP (рис. 4.16 (д)) индуцируются на узком месте U .

Если на въезде D возникает расширяющаяся структура синхронизован-

ного потока (WSP) (рис. 4.16 (е, ж, з)), то из-за эффекта захвата этой WSP на узком месте U индуцируется либо LSP (рис. 4.16 (е)), либо другая WSP (рис. 4.16 (ж)), либо GP (на рис. 4.16 (з) показан случай DGP). Заметим, что индуцированная WSP (рис. 4.16 (ж)) имеет другие характеристики, чем исходная WSP. В частности, скорость переднего по потоку фронта индуцированной WSP (или индуцированной DGP) существенно ниже, чем скорость этого фронта в исходной WSP.

(iii) Аналогичные эффекты и нелинейные свойства индуцированного образования структур плотного потока были найдены для случая, когда расположенное выше по течению узкое место U возникает не из-за въезда, а из-за съезда с основной дороги.

Глава 5.

Разработка алгоритмов и комплекса программ для моделирования интеллектуальных транспортных технологий

5.1. Вычислительный эксперимент по моделированию коммуникации между машинами (V2V communication) с целью предотвращения образования пробок

5.1.1. О транспортных приложениях ad-hoc сетей коммуницирующих автомашин

Создание ad-hoc сетей коммуницирующих автомашин, для которых одной из базовых технологий является радиосвязь между автомашинами, представляет собой одну из важнейших областей научных исследований при разработке будущих ИТС. Это связано с большим числом возможных приложений ad-hoc сетей коммуницирующих автомашин, включая различные системы предупреждения об опасности, ориентированные на окружающий транспортный поток системы ассистента водителя, индивидуальные информационные и прогнозные системы в автомобиле, улучшение характе-

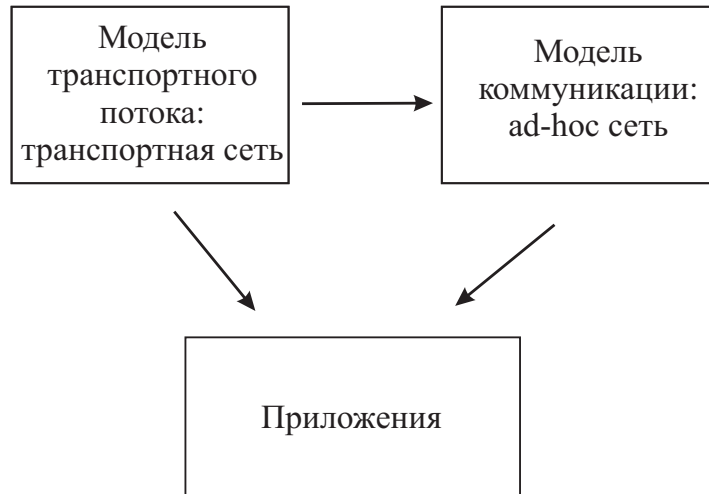


Рис. 5.1: Стандартная схема тестовой системы для численного моделирования ad-нос сети коммуницирующих автомашин (например, [92, 287]).

ристик транспортных потоков с помощью адаптивных систем управления, и т.п. [44, 64, 104, 304–306, 319]. Однако, оценка качества ad-нос сетей из коммуницирующих автомашин требует достаточно большого количества таких машин в реальном транспортном потоке, т.е., натурные исследования ad-нос сетей коммуницирующих автомашин очень сложны и затратны. По этой причине, для проверки работоспособности и эффективности ad-нос сетей коммуницирующих автомашин, базирующихся на радиосвязи между автомашинами, надежное численное моделирование ad-нос сетей коммуницирующих автомашин имеет большое значение и практически незаменимо.

Стандартная схема для разработки тестовой системы для численного моделирования ad-нос сети коммуницирующих автомашин включает собственно микроскопическую модель транспортного потока, модель коммуникации между автомобилями, которая часто базируется на использовании ns-2 симулятора [236], и модель приложений для использования в автомашине полученной по сети информации (блок “Приложения” на рис. 5.1) (см., например, [92, 287, 292]). Модель приложений определяет, например, необходимые изменения в поведении (или настройках) автомобиля в транспортном потоке после получения по ad-нос сети соответствующего сообщения и/или передаче при необходимости полученного сообщения другим автомашинам. В таких тестовых системах имеются две различные сети: (i) транспортная сеть, которая моделируется на основе численной модели

транспортного потока и (ii) возникающая при коммуникации автомобилей ad-hoc сеть, которая моделируется путем использования модели коммуникации, причем в этой модели положение и другие характеристики коммуницирующих автомашин взяты из результатов расчета модели транспортного потока в ближайший момент времени.

Численное моделирование большого числа связанных в сеть коммуницирующих автомашин с помощью известных моделей коммуникации требует очень большого времени для расчетов. По этой причине, часто модель коммуникации (блок “модель коммуникации” на рис. 5.1) рассчитывается на основе предварительно полученных данных численного моделирования транспортного потока (офф-лайн моделирование). В некоторых тестовых системах, чтобы изучить приложения, в которых поведение автомобиля меняется в результате полученной информации, вычисления для модели коммуникации выполняются после каждого шага вычислений модели транспортного потока. В любом случае, использование данной схемы моделирования (рис. 5.1) требует очень большого времени вычислений, иногда на несколько порядков больше, чем время движения автомашин в реальном транспортном потоке.

В рамках модели коммуникации используются определенные правила для передачи сообщений по радио между коммуницирующими автомашинами. Если в автомашине имеются сообщения для передачи и радиоэфир свободен, сначала передается сообщение, которое имеет наибольший приоритет и/или является первым в очереди сообщений. Чтобы предотвратить “столкновение” сообщений, посылаемых различными коммуницирующими автомашинами, применяется определенный метод доступа к эфиру.

В дальнейшем моделировался базовый метод доступа стандарта IEEE 802.11e [101–103], состоящий в следующем. Доступ к радиоэфиру невозможен, когда радиоэфир занят. После того, как радиоэфир станет свободным, в соответствии с методом доступа IEEE 802.11e, в каждой коммуницирующей автомашине независимым образом выполняется так называемая процедура отсрочки (backoff procedure). По окончании процедуры отсрочки снова проверяется, свободен ли радиоэфир или занят.

В соответствии с методом доступа IEEE 801.11e, возможны следующие

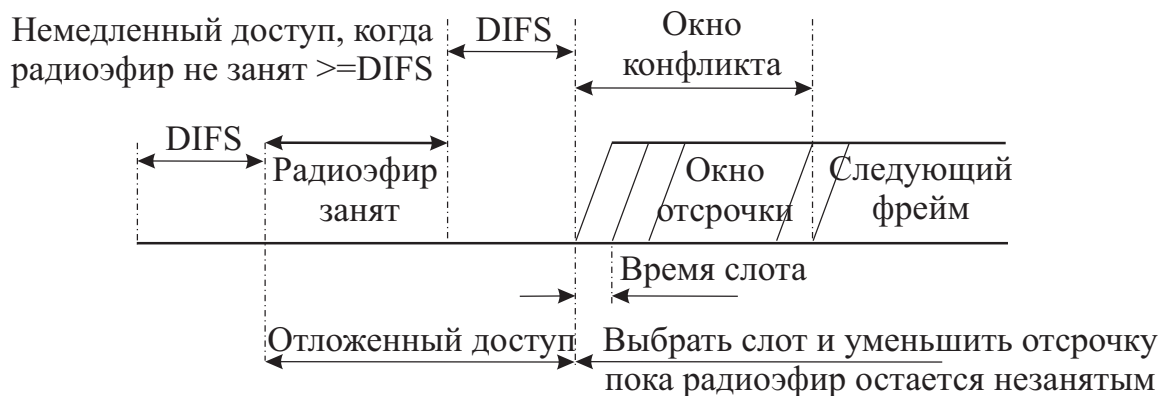


Рис. 5.2: Схема базового метода доступа IEEE 802.11e для передачи сообщений [101–103], DIFS – постоянная.

случаи:

(i) Если мощность ни одного сигнала из матрицы сигналов на антенне радиосистемы, установленной на автомашине, не превышает порог получения сигнала ($RXTh$), прием сообщения от других автомашин не происходит. В этих условиях возможны два случая:

(а) Если суммарная мощность всех сигналов, приходящих на антенну в данный момент времени, меньше, чем порог чувствительности несущей ($CSTh$), то радиоэфир является свободным. Тогда выполняется упомянутая выше процедура отсрочки перед посылкой сообщения (рис. 5.2).

(б) Если суммарная мощность всех сигналов, приходящих на антенну, равна или больше, чем порог $CSTh$, то радиоэфир занят для посылки сообщения автомашиной.

(ii) Мощность наиболее сильного сигнала из матрицы сигналов больше, чем порог получения сигнала $RXTh$. В этих условиях, происходит проверка для матрицы сигналов, превышает ли отношение мощности самого сильного сигнала к суммарной мощности всех остальных сигналов требуемое отношение сигнал-шум (SNR) для выбранной скорости передачи данных (DR) в течении длительности всего сообщения: 1) Если да, то сообщение считается полученным. 2) В противном случае, сообщение не может быть получено.

5.1.2. Комплекс программ для численного моделирования транспортных потоков с коммуницирующими автомобилями в рамках теории трех фаз и анализа влияния коммуникации между автомобилями на свойства транспортного потока

В данной Главе представлены комплекс программ и проведенные с его помощью численные эксперименты по моделированию влияния коммуникации между автомобилями (V2V коммуникация) и/или коммуникации между автомобилями и инфраструктурой (называемой также V2X коммуникацией) на свойства транспортного потока.

Для того, чтобы численные исследования были адекватными с реальными измеряемыми транспортными данными, был разработан комплекс программ для численного моделирования ad-hoc сети коммуницирующих автомобилей, базирующийся на микроскопической модели транспортного потока (Глава 3) в рамках теории трех фаз. В разработанном комплексе программ, в микроскопическую трехфазную модель транспортного потока (Глава 3) была интегрирована модель коммуникации, которая включала в себя: процедуру доступа к каналу связи, базирующуюся на IEEE 801.11e методе, модель распространения радиоволн, характеристики получения сообщения, а также другие эффекты, имеющие место в ad-hoc сетях. Таким образом, численное моделирование как ad-hoc сети коммуницирующих автомобилей, так и транспортного потока, было объединено в рамках единого комплекса программ и выполнялось одновременно.

Это позволило численно моделировать функционирование ad-hoc сети коммуницирующих автомобилей, а также различные сценарии влияния коммуникации между автомобилями на свойства транспортного потока, за время вычислений, сравнимое с реальными характерными временами в транспортном потоке. В дополнение к этому, комплекс программ давал возможность моделировать кооперативное движение автомобилей вместе с различными процессами в транспортном потоке, такими как переход от свободного к плотному потоку на узком месте автодороги, возникновение

движущихся кластеров (бегущих заторов) и возможное влияние сообщений об опасности из-за перехода к плотному потоку на транспортный поток.

5.1.3. Алгоритм для одновременного моделирования ad-hoc сети между коммуницирующими автомобилями и движения автомобилей в транспортном потоке

В этом параграфе разработан алгоритм, в котором одновременно моделируются ad-hoc сеть, возникающая при коммуникации между автомобилями, и движение автомобилей в транспортном потоке.

В едином комплексе программ, разработанной в диссертации [161, 161, 163, 164], который объединяет численное моделирование как ad-hoc сети коммуницирующих автомобилей, так и транспортного потока, вводятся динамические атрибуты для каждой из коммуницирующих автомобилей (рис. 5.3). Все остальные автомобили в транспортной сети, которые не коммуницируют друг с другом, имеют только один динамический атрибут: модельные правила движения автомобиля. Если в добавление к коммуницирующим автомобилям сеть включает также блоки придорожной связи (RSU), в численной модели каждому из этих блоков связи приписываются те же атрибуты, что и коммуницирующей машине, за исключением модельных правил движения автомобиля.

Атрибут “Правила движения автомобиля” задается соответствующими правилами движения автомобиля в стохастической микроскопической трехфазной модели транспортного потока Главы 3.

5.1.3.1. Режим доступа для передачи сообщений

Во время движения коммуницирующей машины в транспортной сети, атрибут “Режим доступа для передачи сообщений”, имеющийся в каждой коммуницирующей машине или блоке придорожной связи (RSU), определяет возможность передачи сообщения машиной независимо от других коммуницирующих машин в асинхронном порядке, т.е., в отли-

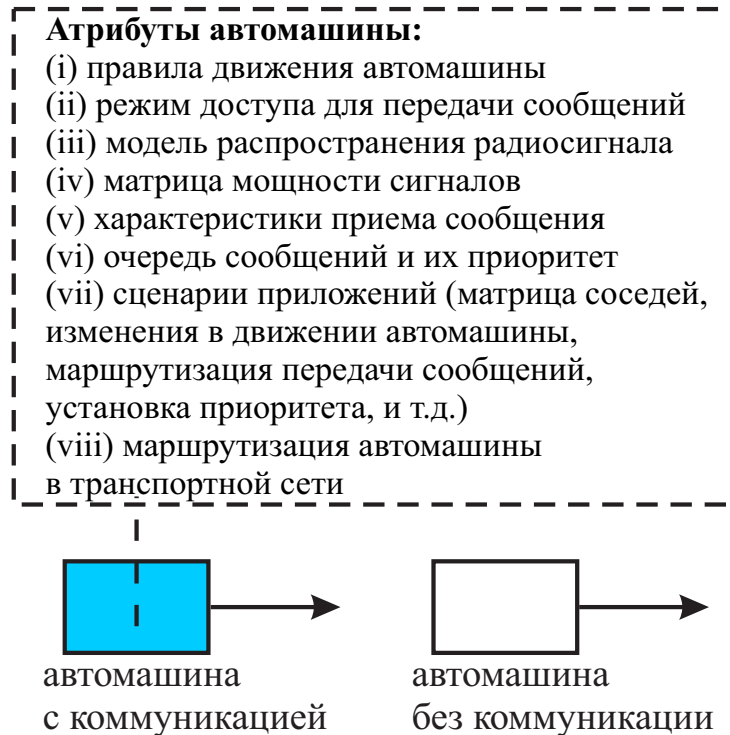


Рис. 5.3: Схема численного моделирования ad-hoc сети коммуницирующих автомашин и транспортного потока в рамках единой тестовой системы.

чие от модельных правил движения автомашины, в модели коммуникации между автомашинами не применяется фиксированная дискретизация времени.

Для атрибута “Режим доступа для передачи сообщений” в едином комплексе программ используется базовый метод доступа IEEE 802.11e.

5.1.3.2. Модель распространения радиоволн

Основываясь на атрибуте “Модель распространения радиоволн”, мощности сигнала сообщения, посланного коммуницирующей автомашиной, рассчитываются во всех местах, где в данный момент находятся другие коммуницирующие автомашины и RSU.

Имеется много разных моделей распространения радиоволн. Однако, реальная мощность посланного автомашиной сигнала сообщения в местах расположения других коммуницирующих автомашин в текущий момент времени может очень сильно зависеть от городской инфраструктуры (например, имеются ли здания, вызывающие сильное отражение сигнала), от

текущего расположения автомашин на дороге (например, от того, как много автомашин находятся на пути сигнала и есть ли среди них грузовики), и т.п.

Один из подходов к решению этой задачи состоит в следующем. Каждая коммуницирующая автомашина может использовать одну из многих моделей распространения радиоволн, записанных в автомашине, и один из разных наборов параметров для выбранной модели. В текущий момент времени, выбор модели распространения радиоволн и ее параметров происходит автоматически, индивидуально для каждой автомашины и независимо от моделей распространения радиоволн, используемых остальными автомашинами. Такой выбор модели распространения радиоволн основывается на текущем расположении автомашин на дороге, а также зависит от городской инфраструктуры, если она известна. Поскольку набор различных моделей распространения радиоволн и их параметров, записанные в автомашине, должны покрывать различные сценарии городской инфраструктуры и распределения автомашин на автодороге, такие модели распространения радиоволн должны основываться на *натурных исследованиях*, сделанных в соответствии с этими различными сценариями. К сожалению, в настоящее время нет в наличии такого детального экспериментального базиса для разработки указанного набора моделей.

По этой причине, в численном моделировании используется одна из простейших моделей распространения радиоволн – известная модель распространения двухлучевого радиосигнала

$$P(R) = P_0(R_0/R)^m, \quad (5.1)$$

где R_0 – это предельная дальность радиосвязи, m – параметр модели ($m \geq 2$), R – расстояние между двумя коммуницирующими автомашинами, P – мощность сигнала, P_0 – константа. В (5.1), предельная дальность радиосвязи R_0 и величина m являются изменяемыми модельными параметрами, которые выбираются в каждый момент времени отдельно для каждой коммуницирующей автомашины, в зависимости от текущего расположения автомашин на автодороге.

5.1.3.3. Матрица мощности сигналов

В модели (рис. 5.3), чтобы принять решение, свободен радиоэфир или занят, а также может ли автомашина получить сообщение или нет, с помощью атрибута “Модель распространения радиоволн” вычисляется мощность сигналов всех сообщений, посланных другими автомашинами в текущий момент времени. Если мощность сигнала больше некоторого заданного порогового уровня, обозначаемого как P_{th} (параметр модели), то такой сигнал записывается в “матрицу мощности сигналов” в этой автомашине:

- В каждый момент времени, матрица мощности сигналов содержит мощности сигналов сообщений, посланных другими автомашинами в ad-hoc сети, для которых мощность сигнала в текущем расположении автомашины превышает пороговый уровень P_{th} .

Пороговая мощность P_{th} выбирается существенно меньше, чем порог чувствительности несущей (CSTh). Чем меньше величина P_{th} , тем выше точность численного моделирования функционирования ad-hoc сети, однако, тем больше время вычислений. Характеристики приема сигнала (т.е., свободен радиоэфир или занят, а также может ли автомашина получить сообщение или нет) связаны с анализом матрицы мощности сигналов, который делается автоматически в текущий момент времени индивидуально для каждой коммуницирующей автомашины. С помощью матрицы мощности сигналов проверяются условия столкновения сигналов и возможность приема сообщения.

Рассмотрим применение матрицы мощности сигналов на гипотетическом примере коммуницирующей автомашины с идентификационным номером (ID) 33 (таблица 5.1). В этом примере, также, как и в результатах численного моделирования, представленных ниже, используется модель (5.1) со следующими параметрами: $R_0 = 200$ м, $P_0 = 10^{-9}$ мВт, $RXTh = -90$ дБ, $CSTh = -96$ дБ, $SNR = -6$ дБ. Тогда в матрице мощности сигналов автомашины 33 присутствуют несколько сигналов, посланных в данный момент времени t , мощность которых превышает порог $CSTh = -$

Таблица 5.1: Гипотетический пример матрицы мощности сигналов

ID автомашины, посылающей сообщение	25	382	37	36	31
Расстояние (в метрах) между принимающей сообщение автомашинной 33 и передающей автомашиной	234	345	300	70	562
Мощность принимаемого сигнала (в дБ) в месте нахождения автомашины 33	− 91	− 95	− 93	− 81	− 99

96 дБ в месте расположения автомашины 33. Однако, только мощность сигнала, посылаемого автомашиной с ID 36, которая равна -81 дБ, превышает порог получения сигнала $RX_{Th} = -90$ дБ. Отношение между мощностью этого самого сильного сигнала, посланного автомашиной с ID 36, и суммарной мощностью всех остальных сигналов, записанных в матрице мощности сигналов, больше, чем требуемое отношение сигнал-шум $SNR = -6$ дБ в течении всей длительности сообщения. Таким образом, сообщение, посланное автомашиной 36, которая находится на расстоянии 70 м от автомашины 33, будет получено автомашиной 33.

В численных экспериментах, представленных ниже, была использована пороговая мощность $P_{th} = -116$ дБ, что позволило достичь хорошего баланса между точностью и временем вычислений. Результаты моделирования изменяются в диапазоне около 1%, если вместо величины $P_{th} = -116$ дБ использовать пороговую мощность $P_{th} = -126$ дБ.

5.1.3.4. Характеристики приема сообщения

Характеристики приема сообщения связаны с анализом матрицы мощности сигналов из § 5.1.3.3, который выполняется автоматически в каждый момент времени индивидуально для каждой коммуницирующей автомашины. В частности, эта матрица используется для проверки условий, свободен радиоэфир или занят, а также может ли автомашина получить сообщение или нет.

Матрица мощности сигналов используется для принятия решения, может ли в данный момент времени быть получено текущее сообщение или же имеет место столкновение между двумя или больше сообщениями для текущего расположения автомашины. Столкновение между сообщениями происходит при условии, что в матрицы мощности сигналов присутствуют два или больше сигнала и самый мощный сигнал превосходит пороговую мощность для получения сигнала ($RXTh$), однако, основываясь на приведенной выше процедуре, принимается решение, что сообщение не может быть принято в данный момент времени. Решение о столкновении сообщений в дальнейшем используется при анализе эффективности передачи сообщений в ad-hoc сети.

5.1.3.5. Очередь сообщений и их приоритет

Основываясь на свойствах приложений, которые должны быть смоделированы, каждая коммуницирующая автомашина (или RSU) имеет атрибут организации очереди сообщений и выполнения приоритета отдельных сообщений, управляемых автоматически. Поскольку каждая коммуницирующая автомашина или RSU управляют этими функциями индивидуально, данный атрибут может выбираться различным образом для разных типов коммуницирующих автомашин и RSU.

5.1.3.6. Сценарии приложений

Каждая коммуницирующая автомашина (или RSU) имеет атрибут “Сценарии приложений”. Этот атрибут управляет организацией всех сообщений, которые предаются и принимаются. На основе этого атрибута

и содержания сообщения, полученного коммуницирующей автомашиной, эта автомашина может изменить свое поведение в транспортном потоке (например, притормозить или сменить полосу, или сменить свой маршрут, т.д.)

5.1.4. Влияние сообщения об опасности “впереди стоит сломавшаяся автомашина” на возникновение структур плотного потока

Рассмотрим сценарий приложения, в котором из-за поломки одной из автомашин, стоящей на правой полосе двухполосной дороги в точке с координатой 12.5 км, приближающиеся к ней автомашины должны тормозить и останавливаться на правой полосе. После того, как водитель, первоначально едущий по правой полосе, обнаруживает сломавшуюся автомашину, он переходит на левую полосу. Зададим расстояние, на котором водитель сможет увидеть этот сломавшийся автомобиль и соответственно начнет пытаться перейти на левую полосу, равным 100 м. Результаты численного моделирования средней скорости автомашин показаны на рис. 5.4 (левый рисунок для левой полосы и правый рисунок для правой полосы) для величины потока в исходном свободном потоке $q_{in} = 1125$ автомашин/ч на полосу. Можно видеть, что в отсутствие коммуникации между автомашинами возникает сложная пространственно-временная структура плотного потока, вызванная стоящей сломавшейся автомашиной впереди.

Рассмотрим тот же сценарий для случая коммуникаций между некоторыми автомашинами, которые посылают сообщение “предупреждение об опасности” о стоящей сломавшейся автомашине впереди. Предположим, что после того, как коммуницирующие автомашины получают данное сообщение, то такие автомашины, если движутся по правой полосе, начинают переходить на левую полосу на значительно большем расстоянии в 600 м от стоящей сломавшейся автомашины. Поскольку автомашины без коммуникации начинают менять полосу на расстоянии 100 м, результаты моделирования зависят от процента коммуницирующих автомашин, как

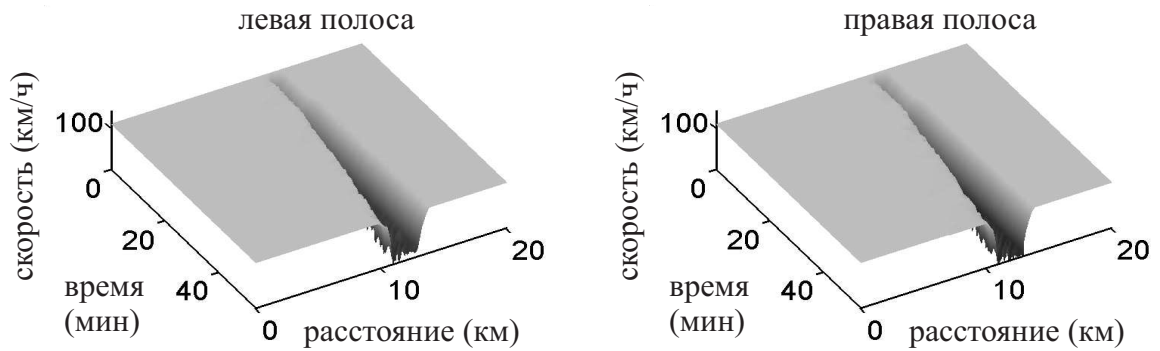


Рис. 5.4: Численное моделирование образования плотного потока из-за сломавшейся автомашины, стоящей на правой полосе двухполосной автодороги, при отсутствии коммуникаций между автомашинами.

показано на рис. 5.5. Заметим, что наглядности результатов сломавшаяся автомашина не показана на рис. 5.4 и 5.5.

Можно видеть, что существует определенное критическое значение для процента коммуницирующих автомашин, в данном численном эксперименте примерно равное 70% (рис. 5.5):

(i) Если процент коммуницирующих автомашин больше критического значения, образование плотного потока вообще происходит.

(ii) В противном случае, образуется структура плотного потока, у которой задний по потоку фронт фиксирован вблизи места остановки сломавшейся автомашины; характеристики этой структуры плотного потока почти такие же, как и в случае транспортного потока без коммуницирующих автомашин (рис. 5.4). Однако, когда процент коммуницирующих автомашин меньше, но близок к критическому значению, имеет место задержка во времени возникновения структуры плотного потока, которая обозначена как $T^{(B)}$ на рис. 5.4 (в). Эта временная задержка является случайной величиной: при фиксированных параметрах расчета в разных реализациях были получены сильно различные значения $T^{(B)}$.

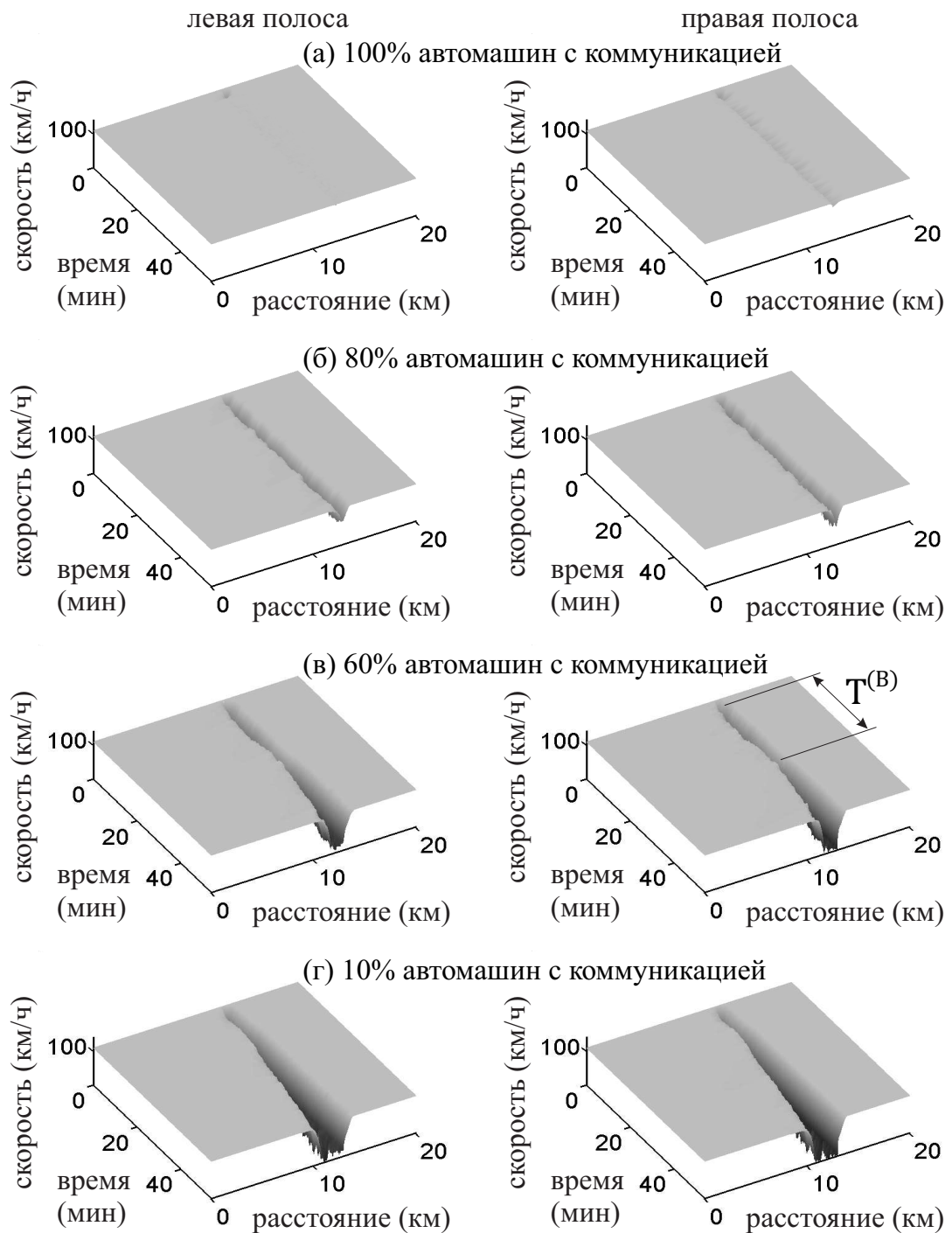


Рис. 5.5: Численное моделирование влияния предупреждения об опасности на возникновение плотного потока из-за сломавшейся автомашины при различном проценте коммуницирующих автомашин.

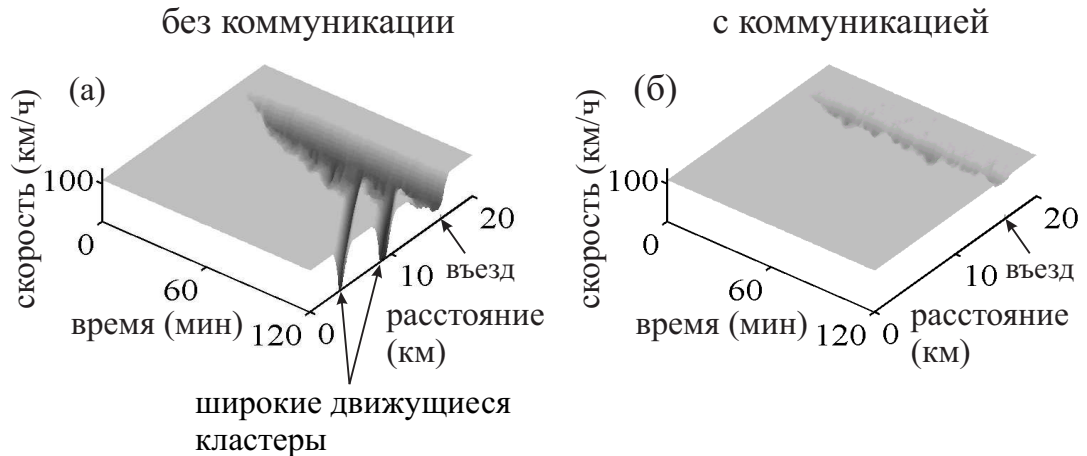


Рис. 5.6: Численное моделирование предотвращения перехода к плотному потоку на узком месте из-за на автодорогу с помощью коммуникации между автомобилями: скорость как функция координаты и времени в транспортном потоке без коммуникации между автомобилями (а) и при наличии коммуникации между автомобилями (б).

5.1.5. Предотвращение перехода к плотному потоку на узком месте автодороги с помощью ad-hoc сети коммуницирующих автомобилей

На основе результатов Главы 4 можно предположить, что существуют по крайней мере две гипотетические возможности предотвратить переход к плотному потоку на узком месте из-за въезда на автодорогу с помощью изменений в поведении коммуницирующих автомобилей на участке дороги вблизи въезда:

(i) Уменьшить амплитуду возмущений на основной дороге при въезде автомобилей на правую полосу основной дороги с полосы въезда. Это уменьшит вероятность возникновения возмущений с амплитудой, необходимой для перехода к плотному потоку.

(ii) Увеличить вероятность эффекта переускорения.

В вычислительном эксперименте на рис. 5.6 на автодороге имеется узкое место из-за въезда, координата которого 16 км. Величина потока на основной дороге и во въезд равны соответственно $q_{in} = 1827$ автомобилей/ч на полосу и $q_{on} = 600$ автомобилей/ч. При данных значениях потоков, если нет V2V коммуникации, вблизи узкого места на автодороге возникает об-

щая структура плотного потока (GP) (рис. 5.6 (а)). Эта общая структура плотного потока состоит из области плотного синхронизованного потока и последовательности широких движущихся кластеров, бегущих против потока (обозначенных как “ широкие движущиеся кластеры”).

Рассмотрим теперь сценарий (рис. 5.6 (б)), что все автомашины являются коммуницирующими, при этом они постоянно обмениваются неприоритетными сообщениями, которые пытаются передать с временным интервалом 0.1 с. В свою очередь, автомашины, едущие по полосе въезда и намеревающиеся въехать на основную дорогу, посылают приоритетные сообщения для соседних автомашин, едущих по правой полосе на основной дороге. В рассматриваемом сценарии, автомашина, едущая по правой полосе, после получения приоритетного сообщения увеличивает временной интервал до автомашины впереди, чтобы облегчить въезд автомашин на основную дорогу. В результате, по сравнению со случаем, когда нет коммуникации между автомашинами и возникает GP (рис. 5.6 (а)), рассматриваемые изменения в поведении автомашин при наличии коммуникации между ними уменьшают возмущения скорости в свободном потоке вблизи узкого места на автодороге и тем самым предотвращают переход к плотному потоку (рис. 5.6 (б)).

5.1.6. Влияние ad-hoc сети коммуницирующих автомашин на пространственно-временные структуры плотного потока

В этом параграфе рассматривается вычислительный эксперимент в тех же условиях, что и в предыдущем § 5.1.5, однако не применяется рассмотренный выше метод управления свойствами транспортного потока через изменение поведения коммуницирующих автомашин в свободном потоке вблизи въезда на основную дорогу. В этом случае, при величине потока по основной дороге $q_m = 1946$ автомашин/ч на полосу происходит спонтанный переход к плотному потоку с последующим образованием общей структуры плотного потока (GP) (рис. 5.7 (а, б)). В соответствии с теорией трех

фаз, можно предположить, что существуют по крайней мере две гипотетические возможности предотвратить возникновение движущихся кластеров в синхронизованном потоке с помощью изменений в поведении коммуницирующих автомашин, движущихся в синхронизованном потоке:

(i) Уменьшение амплитуду возмущений в синхронизованном потоке выше по течению от узкого места из-за въезда автомашин на автодорогу. Это уменьшит вероятность возникновения возмущений с амплитудой, необходимой для фазового перехода к широким движущимся кластерам.

(ii) Уменьшение плотности синхронизованного потока выше по течению от узкого места. Это увеличит критическую амплитуду возмущений скорости, требуемую для возникновения широких движущихся кластеров в синхронизованном потоке. Чем больше критическая амплитуда возмущений скорости, тем меньше вероятность возникновения широких движущихся кластеров.

Рассмотрим сценарий, что после того, как на узком мест автодороги возникает синхронизованный поток, коммуницирующие автомашины, которые достигают синхронизованного потока посылают приоритетное сообщение об уменьшении скорости коммуницирующим автомашинам, которые движутся в свободном потоке выше по течению. Каждое такое сообщение содержит информацию об необходимости увеличить дистанции до автомашины впереди не меньше некоторой минимальной, пока автомашины двигаются в синхронизованном потоке.

В правилах движения стохастической микроскопической модели Главы 3, соответствующие изменения в поведении автомашин моделируются с помощью увеличения вероятности p_1 в (3.19) от исходной величины 0.3 для автомашин, у которых нет информации о требовании увеличить дистанцию до автомашины впереди, до 0.55 для автомашин, которые получили данное сообщение. Чем больше величина p_1 , тем больше разница между дистанцией до автомашины впереди и минимальной безопасной дистанцией, и, поэтому, тем меньше вероятность возникновения широких движущихся кластеров в синхронизованном потоке [148]. В результате увеличения расстояния между автомашинами в синхронизованном потоке, при том же значении потоков, как и на рис. 5.7 (а, б), широкие движущиеся кластеры

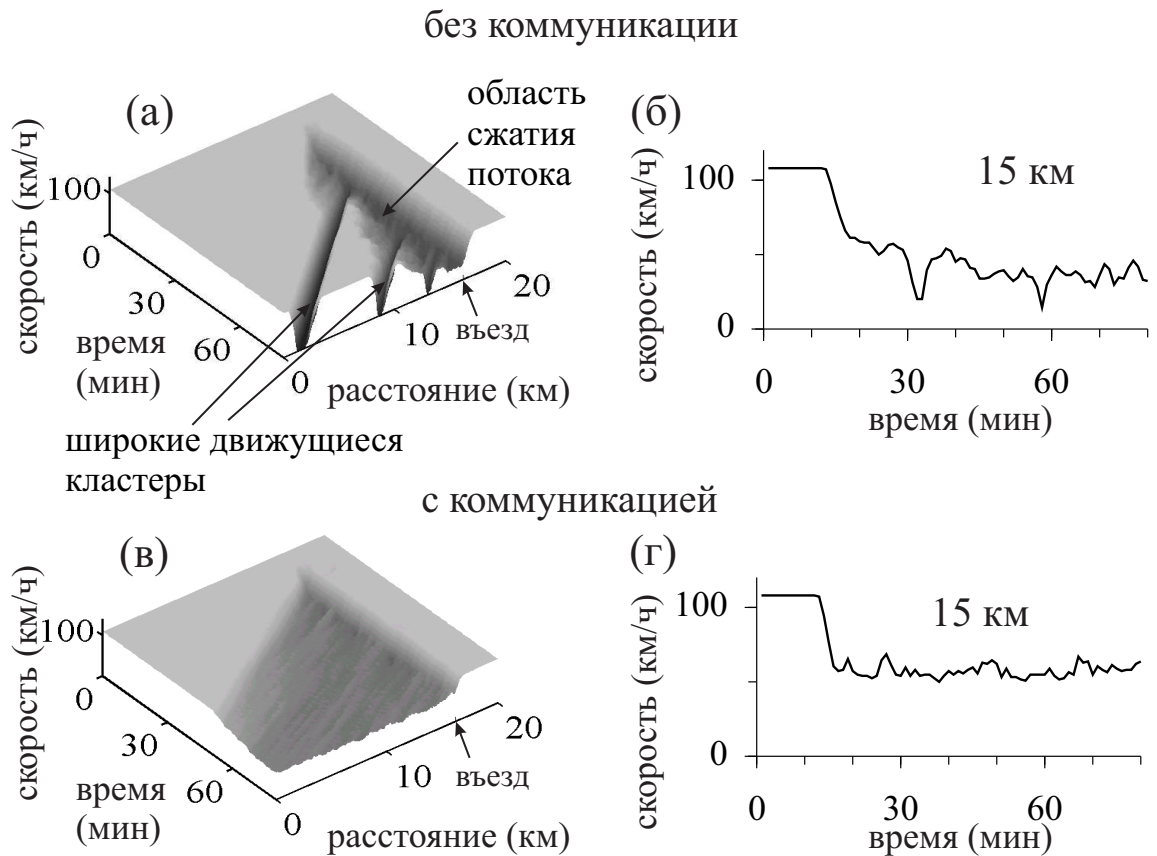


Рис. 5.7: Численное моделирование влияния коммуникации между автомобилями на пространственно-временные структуры плотного потока: скорость как функция координаты и времени (а, в) и на детекторе с координатой $x = 15$ км (б, г) в транспортном потоке без коммуникации между автомобилями (а, б) и при наличии коммуникации между автомобилями (в, г).

уже не возникают, а вместо GP формируется расширяющаяся структура синхронизованного потока (WSP) (рис. 5.7 (в, г)).

Действительно, если в области сжатия синхронизованного потока, в которой возникают движущиеся кластеры внутри GP (рис. 5.7 (а, б)), среднее расстояние между автомобилями около 15 м, то это расстояние внутри WSP (рис. 5.7 (в, г)) примерно равно 25 м. В результате трансформации GP в WSP оказалось, что средняя скорость движения автомобилей в синхронизованном потоке выше по течению от узкого места увеличилась с примерно 40 км/ч внутри GP до 60 км/ч внутри WSP. Это приводит к значительному увеличению эффективности и безопасности транспортного потока.

На основании проведенного рассмотрения можно сделать следующие выводы:

1. Численное моделирование, проведенное на основе разработанного комплекса программ, позволило выполнить расчеты различных приложений V2V коммуникации и работы ad-hoc сетей между коммуницирующими автомобилями одновременно с моделированием реального поведения водителей в транспортном потоке. Это было достигнуто благодаря следующим преимуществам разработанного комплекса программ: как в реальной ad-hoc сети в транспортном потоке, в комплексе программ фактически моделируется единая сеть, в которой V2V коммуникация, работа ad-hoc сети и характеристики транспортного потока рассчитываются одновременно во время движения автомобилей. В результате данный комплекс программ значительно уменьшает время расчета и показывает достаточную точность вычислений. Эти преимущества комплекса программ позволяют более легко понять специфику функционирования ad-hoc сети и транспортных потоков в приложениях, в которых содержание передаваемых по сети сообщений существенным образом влияет на поведение автомобилей. Это особенно важно для систем безопасности на основе коммуникации, которые в настоящее время изучаются в различных исследовательских проектах (например, WILLWARN [306]).

2. Численное моделирование, проведенное на основе разработанного комплекса программ, показывает, что изменения в поведении водителей, совершаемые с использованием ad-hoc сети коммуницирующих автомобилей,

действительно могут препятствовать переходу от свободного к плотному потоку и/или приводить к исчезновению движущихся кластеров (движущихся заторов).

5.2. Вычислительный эксперимент по моделированию плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами

5.2.1. Микроскопическая теория возмущений в свободном транспортном потоке, вызывающих переход к плотному транспортному потоку вблизи узких мест на автомагистрали

В работе [177] на основе анализа эмпирических данных измерений транспортного потока было установлено, что возмущения в свободном транспортном потоке, вызывающие переход к плотному транспортному потоку вблизи узких мест на автомагистрали, связаны с наличием волн в свободном потоке. Такие волны распространяются в направлении потока со скоростью, близкой к разрешенной скорости грузовых автомашин в свободном потоке (около 80 км/ч). Для объяснения эмпирических данных работы [177], была использована представленная в Главе 3 модель транспортного потока на двухполосной автодороге с узким местом из-за въезда на автодорогу. В рамках этой модели рассматривался транспортный поток, состоящий одинаковых легковых автомашин, в котором также двигалась более медленная грузовая автомашина. Такая модель транспортного потока с медленно движущейся автомашиной известна как модель движущегося узкого места (moving bottleneck) (см. § 3.4.2). Используемая в вычислительном эксперименте модель движущегося узкого места показана на рис. 2.7 (б).

Был разработан алгоритм для моделирования взаимодействия между

автомашинами при смене полосы и обгоне медленно движущейся машины в транспортном потоке. Алгоритм обеспечивает реалистичную динамику смены полосы, в частности, отсутствие резких торможений.

В рассмотренной в § 3.4.2 модели движущегося узкого места (moving bottleneck), оно вызывается медленной автомашиной, которая едет по правой полосе с максимальной скоростью v_M , которая меньше скорости легковых автомашин в свободном потоке v_{free} . При этом предполагается, что существует область длины L_c вверх по потоку от медленной автомашины (рис. 2.7 (б)), которая тоже *движется* с той же скоростью v_M и в пределах которой все легковые автомашины на правой полосе, догоняющие медленную автомашину, переходят на левую полосу. Такой переход на левую полосу происходит, когда выполняются условия безопасности при смене полосы (§ 3.4). Длина L_c связана со средним расстоянием, на котором водители распознают медленно движущуюся автомашину впереди.

Вызванная медленно движущейся автомашиной волна в свободном потоке, когда она достигает узкого места из-за въезда на автодорогу, может увеличивать амплитуду возмущения потока на этом узком месте и тем самым приводить к переходу к плотному потоку (F→S переход) (рис. 5.8 (а)).

5.2.2. Двухмерная асимметричная структура волны в свободном потоке и возникновение возмущения, приводящего к спонтанному переходу от свободного к плотному транспортному потоку на узком месте автодороги

Чтобы понять двухмерную асимметричную структуру волн в свободном потоке, найденную в эмпирических данных [177], а также возможное воздействие этой волны на переход от свободного к плотному потоку, численно исследовалось распределение скорости, величины потока, и плотности по разным полосам автодороги (рис. 5.8), вызванное движущимся узким местом из-за медленной автомашины. Представленные на рис. 5.8 резуль-

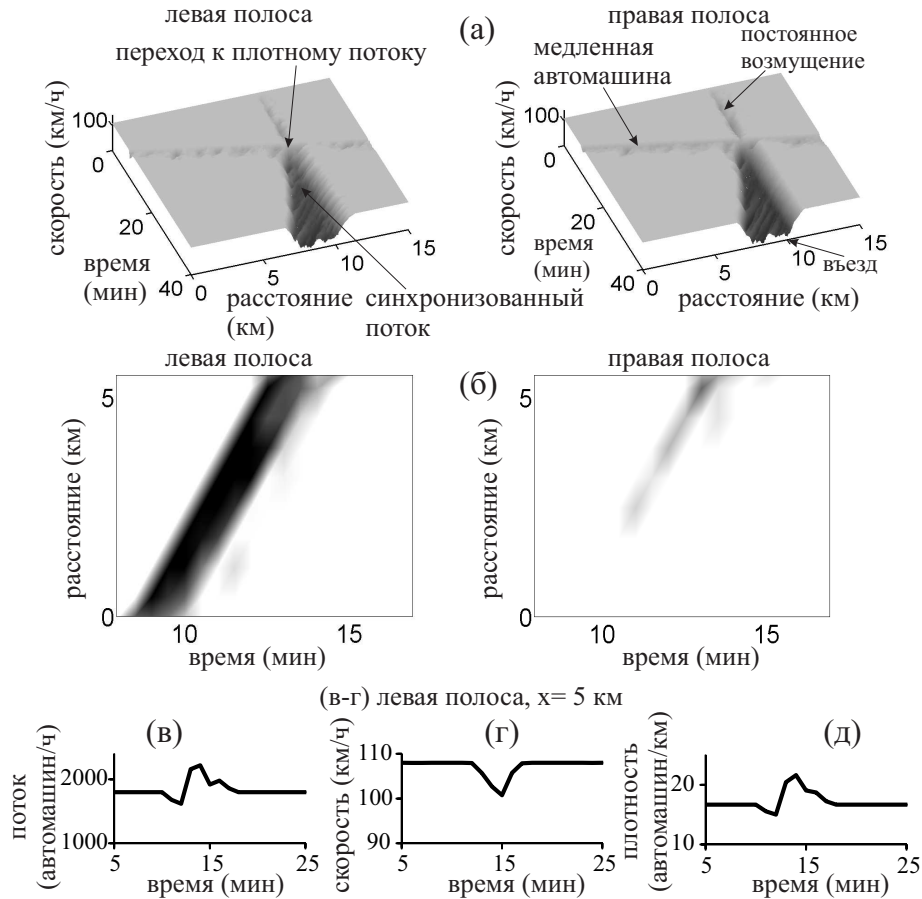


Рис. 5.8: Численное моделирование перехода от свободного к плотному транспортному потоку, вызванного волной в свободном потоке, на двухполосной автодороге с узким местом из-за въезда на автодорогу: (а) – распределения скорости $v(x, t)$ как функции координаты и времени, показывающие переход от свободного к плотному потоку, вызванный волной за медленно движущейся грузовой автомашиной в свободном потоке (слева – левая полоса, справа – правая полоса); (б) – распределение потока $q(x, t)$ по полосам автодороги в волне за медленно движущейся грузовой автомашиной в свободном потоке (слева – левая полоса, справа – правая полоса), распределение потока показано серым цветом переменной степени (степень серого цвета меняется от белого до черного, когда поток (на полосе) увеличивается от 2000 автомашин/ч (белый) до 2150 автомашин/ч (черный)) и получено с помощью виртуальных детекторов, движущихся со скоростью медленной автомашины v_M [177]; (в-д) – величина потока (в), скорость (г), и плотность (д) как функции времени в волне в свободном потоке на левой полосе, полученные неподвижным виртуальным детектором в позиции $x = 5$ км. $v_M = 82.8$ км/ч, $v_{free} = 108$ км/ч, $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 750)$ автомашин/ч, $x_{on} = 10$ км, $x_{on}^{(e)} = 10.3$ км. Другие параметры модели даны в таблицах 3.1, 3.2 и 3.3.

таты основываются на микроскопическом анализе траекторий автомашин на двухполосной автодороге, приведенном в § 5.2.4.

Для обгона медленно движущейся автомашины легковые машины, которые сначала двигались по правой полосе, при приближении к медленно движущейся автомашине переходят на левую полосу (§ 5.2.4.1). Эта постоянная смена полосы автомашинами с правой полосы на левую вызывает увеличение плотности и, соответственно, потока на левой полосе поблизости от медленно движущейся автомашины. В результате возникает волна увеличенного потока, которая движется со скоростью u_M медленной автомашины (рис. 5.8 (б)). Кроме того, из-за постоянной смены полосы с правой на левую вблизи медленно движущейся автомашины возникает волна пониженной скорости на левой полосе. Временные зависимости скорости, величины потока, и плотности на левой полосе внутри волны (рис. 5.8 (в-д)), измеренные неподвижным виртуальным детектором, подтверждают эти выводы о свойствах волны, бегущей за медленной автомашиной в свободном потоке.

Имеет место также увеличение потока на правой полосе, которое вызвано увеличением плотности автомашин выше по потоку от движущегося узкого места. Однако, это увеличение потока существенно меньше, чем на левой полосе (рис. 5.8 (б)). Таким образом, волна увеличенного потока за медленной автомашиной в свободном потоке показывает двумерную асимметричную структуру, характеристики которой различны на разных полосах автодороги (рис. 5.8 (б)). Это качественно тот же эффект двумерной асимметричной структуры волн в свободном потоке, который наблюдается в реальных эмпирических данных [177].

Когда волна за медленно движущейся автомашиной в свободном потоке достигает узкого места из-за въезда автомашин на автодорогу, эта волна вызывает дополнительное уменьшение скорости автомашин по сравнению с пониженной скоростью внутри локального возмущения, постоянно существующего вблизи этого узкого места. В результате волна становится тем возмущением, которое вызывает спонтанный переход от свободного к плотному потоку вблизи узкого места. Действительно, как показано в § 5.2.4, взаимодействие постоянного локального возмущения с пониженной скоро-

стью вблизи узкого места с волной потока и скорости за медленно движущейся автомашиной приводит к переходу от свободного к плотному потоку вблизи узкого места. В частности, было установлено, что переход от свободного к плотному потоку начинает развиваться именно на левой полосе, на которой поток больше, а скорость меньше, чем вне волны (§ 5.2.4.3).

5.2.3. Вероятностные свойства перехода от свободного к плотному транспортному потоку вблизи узких мест на автомагистрали

Проводилось сравнение вероятностных свойств спонтанного перехода от свободного к плотному потоку для случая транспортного потока с движущимся узким местом из-за медленной автомашины (рис. 5.8) и для случая транспортного потока, состоящего только из одинаковых легковых автомашин, т.е. без движущегося узкого места из-за медленной автомашины (рис. 5.9 (а)). Оказалось, что при значениях потоков (q_{in}, q_{on}) , при которых происходит спонтанный переход к плотному потоку, вызванный движущимся узким местом (рис. 5.8 (а)), может также происходить спонтанный переход к плотному потоку и без этого движущегося узкого места (рис. 5.9 (а)). Различие состоит в том, что при тех же значениях потоков (q_{in}, q_{on}) вероятность спонтанного перехода к плотному потоку $P^{(B)}(q_{sum})$ (рис. 5.9 (б)) существенно выше в транспортном потоке с движущимся узким местом из-за медленной автомашины, чем в транспортном потоке, состоящего только из одинаковых легковых автомашин, т.е. без движущегося узкого места из-за медленной автомашины. Заметим, что вероятность $P^{(B)}(q_{sum})$ рассчитывалась тем же способом, что и описано в § 2.4.3; время наблюдения выбиралось как и ранее $T_{ob} = 30$ мин для потока одинаковых легковых автомашин, а в случае транспортного потока с движущимся узким местом из-за медленной автомашины время $T_{ob} = 10$ мин начинало отсчитываться после того, как медленная автомашина (рис. 5.8 (а)) достигала начала области въезда на автодорогу при $x_{on} = 10$ км.

В самом деле, зависимость вероятности перехода к плотному потоку

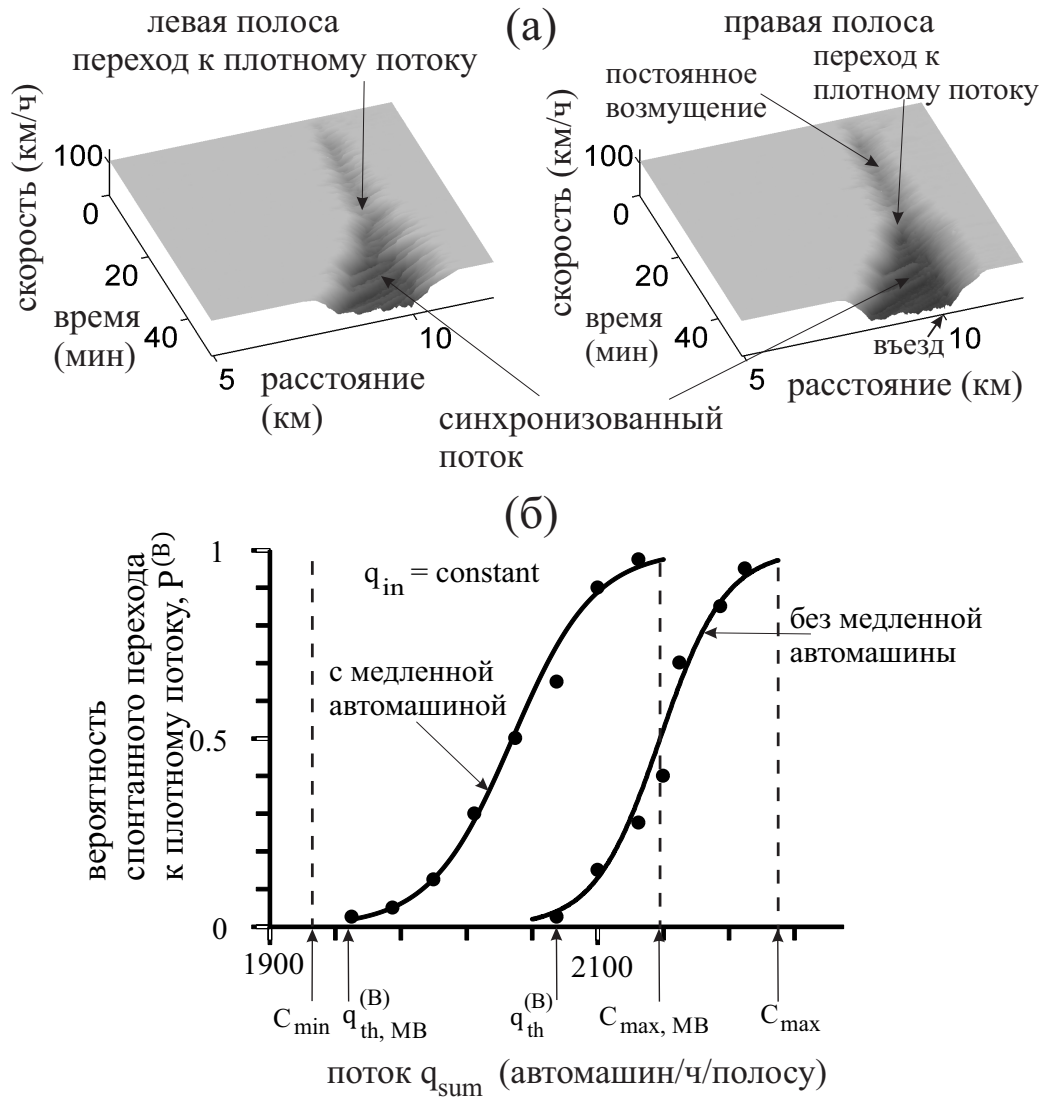


Рис. 5.9: Вероятность перехода от свободного к плотному потоку в транспортном потоке с движущимся узким местом из-за медленной автомашины и без него: (а) – скорость как функция координаты и времени для случая транспортного потока, состоящего только из одинаковых легковых автомашин, т.е. без движущегося узкого места из-за медленной автомашины (слева – левая полоса, справа – правая полоса), $q_{in} = 1800$ автомашин/ч на полосу, $q_{on} = 750$ автомашин/ч; (б) – вероятность перехода от свободного к плотному потоку $P^{(B)}(q_{sum})$ в транспортном потоке с движущимся узким местом из-за медленной автомашины (левая кривая, обозначенная как “с медленной автомашиной”) и без движущегося узкого места (правая кривая, обозначенная как “без медленной автомашины”) как функция суммарного потока q_{sum} ниже въезда на автодорогу. Суммарный поток (на одну полосу) $q_{sum} = q_{in} + 0.5q_{on}$ изменялся за счет изменения потока во въезд q_{on} при постоянном потоке по основной дороге $q_{in} = 1800$ автомашин/ч на полосу. $C_{min} \approx 1925$ автомашин/ч на полосу. Остальные параметры модели такие же, как и на рис. 5.8.

$P^{(B)}(q_{\text{sum}})$ от потока q_{sum} для транспортного потока с движущимся узким местом из-за медленной автомашины заметно сдвинута влево по оси потоков (левая кривая, обозначенная как “с медленной автомашиной” на рис. 5.9 (б)) относительно соответствующей кривой, описывающей вероятность перехода к плотному потоку $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$ в транспортном потоке, состоящем из одинаковых легковых автомашин, т.е. без движущегося узкого места (правая кривая, обозначенная как “без медленной автомашины” на рис. 5.9 (б)). Каждая из функций $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$ на рис. 5.9 (б) хорошо аппроксимируется формулой (2.69).

Также было найдено, что движущееся узкое место из-за медленной автомашины в транспортном потоке приводит к уменьшению как максимальной пропускной способности автодороги C_{max} (при $q_{\text{sum}} = C_{\text{max}}$ вероятность перехода $P^{(B)} = 1$), так и пороговой величины потока для спонтанного перехода к плотному потоку $q_{\text{th}}^{(B)}$, при которой такой переход еще возможен. Чтобы различать два случая транспортного потока с движущимся узким местом и без него, максимальная пропускная способность C_{max} и пороговая величина потока $q_{\text{th}}^{(B)}$ для транспортного потока с движущимся узким местом обозначены соответственно как $C_{\text{max, MB}}$ и $q_{\text{th, MB}}^{(B)}$ (рис. 5.9 (б)).

В отличие от величин C_{max} и $q_{\text{th}}^{(B)}$, минимальная пропускная способность C_{min} не зависит от того, имеется ли движущееся узкое место в транспортном потоке или нет. Это связано с тем, что при заданном потоке q_{in} (рис. 5.8 и 5.9), минимальная пропускная способность C_{min} , показанная на рис. 5.9 (б), определяется минимальной величиной потока во въезд q_{on} , при которой переход к плотному потоку еще может быть *индуцирован* на узком месте из-за въезда.

Эти вероятностные свойства перехода к плотному потоку позволяют сделать следующие выводы:

- (i) Основной характеристикой *спонтанного* перехода от свободного к плотному потоку (спонтанный F→S переход) является вероятность перехода $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$. В диапазоне потоков $q_{\text{th}}^{(B)} \leq q_{\text{sum}} < C_{\text{max}}$ переход к плотному потоку происходит спонтанным образом с вероятностью $0 < P^{(B)}(q_{\text{sum}}) < 1$, т.е., в некоторых реализациях имеет место пе-

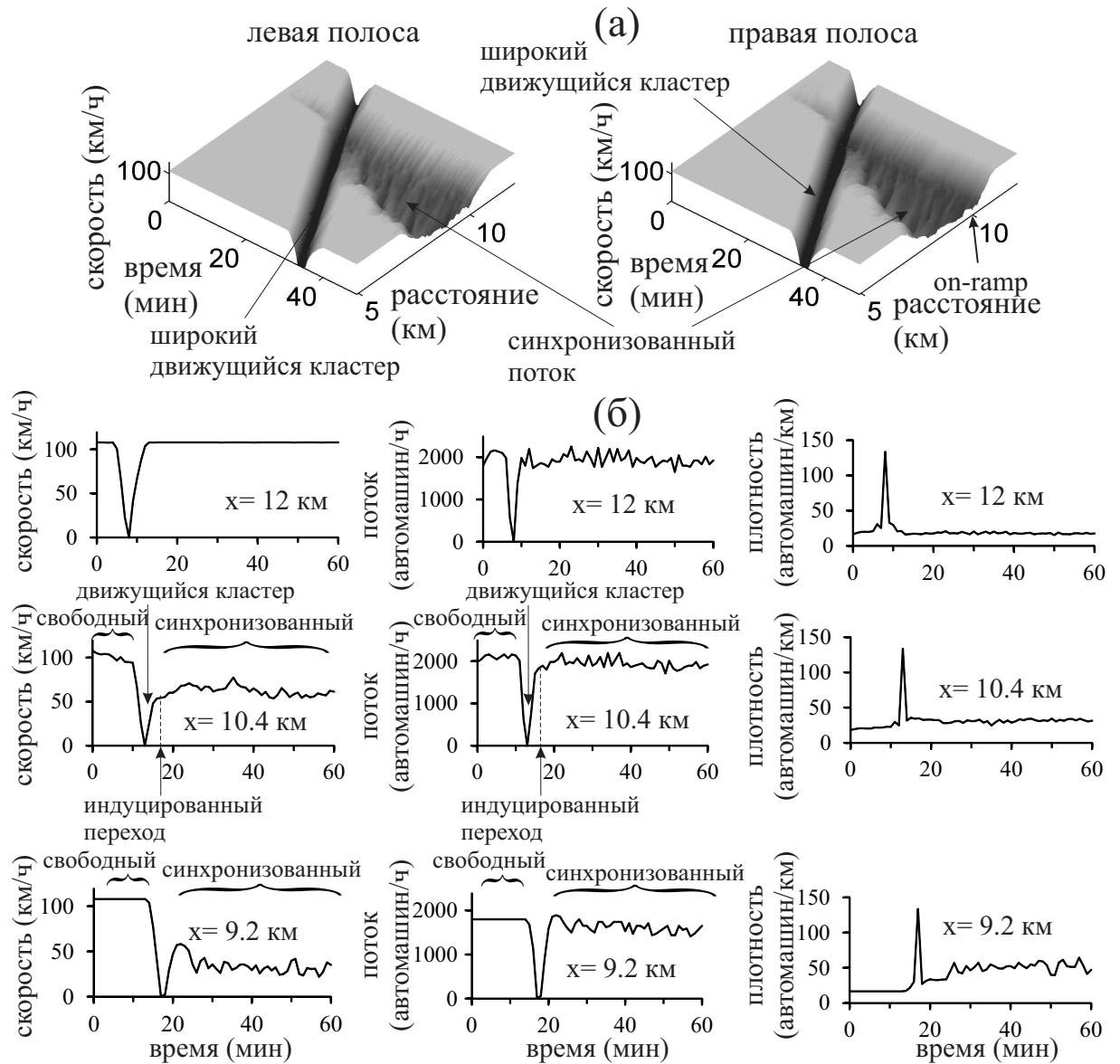


Рис. 5.10: Численное моделирование синхронизованного потока, возникающего в результате индуцированного перехода от свободного к плотному потоку: (а) – скорость как функция координаты и времени для случая перехода от свободного к плотному потоку, индуцированного широким движущимся кластером, проходящим через узкое место из-за въезда на автодорогу (слева – левая полоса, справа – правая полоса); (б) – скорость (слева), величина потока (в середине), и плотность (справа), усредненные по полосам, как функции времени для заданных положений виртуальных детекторов, указанных на рисунке. $q_{in} = 1800$ автомашин/ч на полосу, $q_{on} = 700$ автомашин/ч. Свободный поток, синхронизованный поток, и широкий движущийся кластер обозначены на (б) соответственно как “свободный”, “синхронизованный”, и “движущийся кластер”. Остальные параметры модели такие же, как и на рис. 5.8.

Спонтанный переход к плотному потоку, вызванный медленной автомашиной

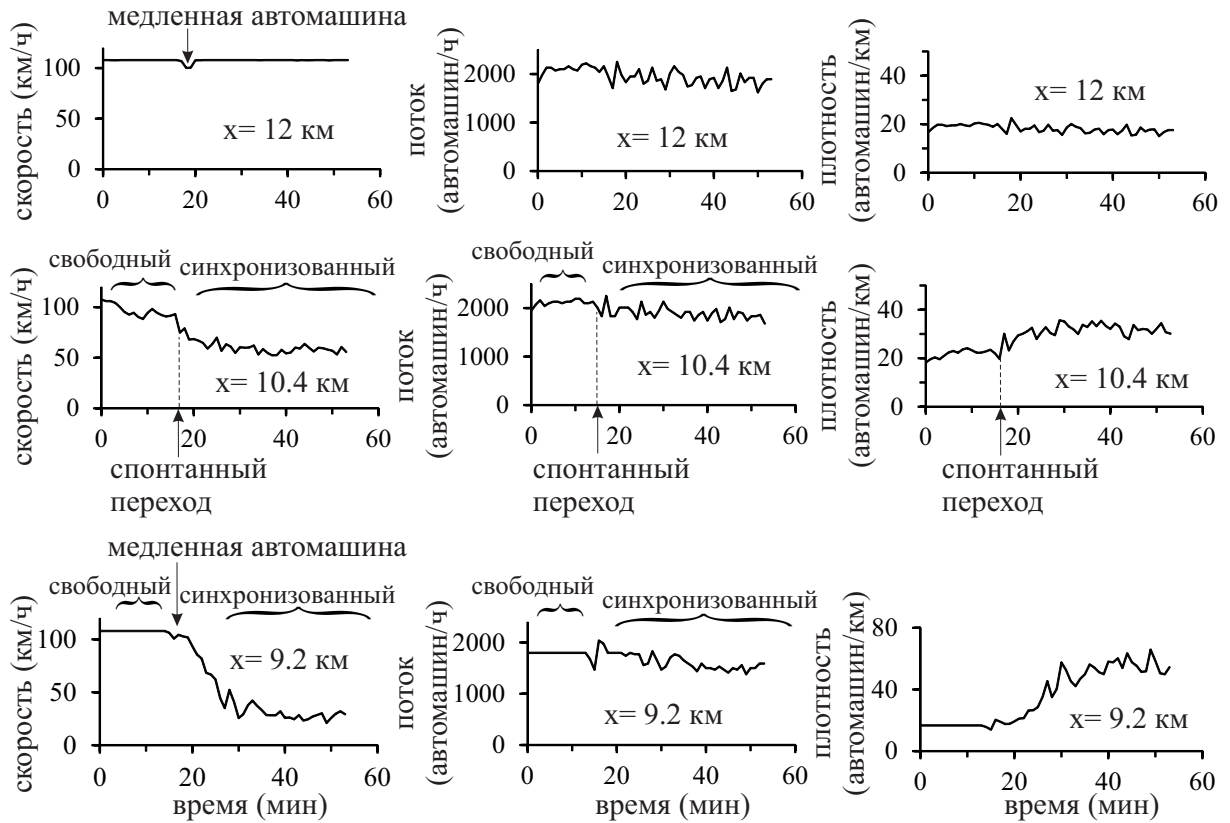


Рис. 5.11: Численное моделирование синхронизованного потока, возникающего в результате перехода от свободного к плотному потоку для случая, когда этот переход вызывается движущимся узким местом из-за медленной автомашины: скорость (слева), величина потока (в середине), и плотность (справа), усредненные по полосам, как функции времени для заданных положений виртуальных детекторов, указанных на рисунке. $q_{in} = 1800$ автомашин/ч на полосу, $q_{on} = 700$ автомашин/ч. Свободный поток и синхронизованный поток обозначены соответственно как “свободный” и “синхронизованный”. Остальные параметры модели такие же, как и на рис. 5.8.

Спонтанный переход к плотному потоку без медленной автомашины

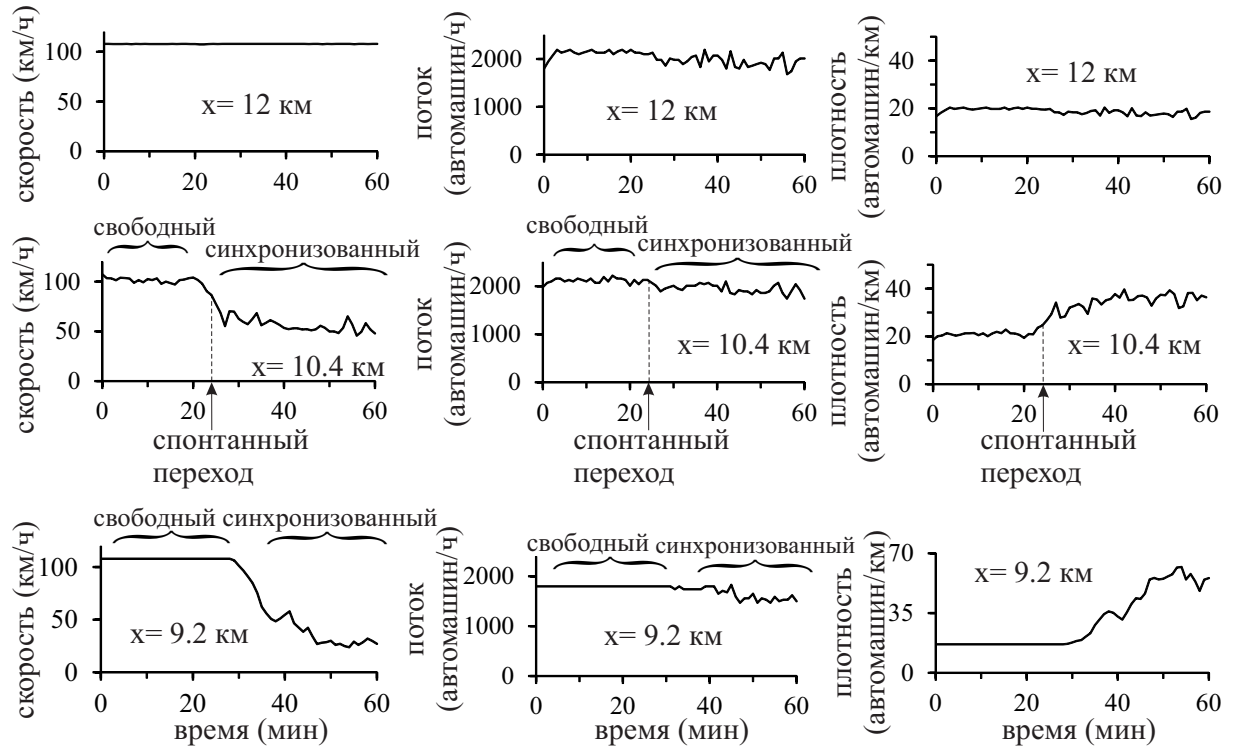


Рис. 5.12: Численное моделирование синхронизованного потока, возникающего в результате перехода от свободного к плотному потоку для случая, когда этот переход вызывается случайными локальными возмущениями вблизи въезда на автодорогу в свободном потоке одинаковых автомашин, т.е. без движущегося узкого местом из-за медленной автомашины: скорость (слева), величина потока (в середине), и плотность (справа), усредненные по полосам, как функции времени для заданных положений виртуальных детекторов, указанных на рисунке. $q_{in} = 1800$ автомашин/ч на полосу, $q_{on} = 700$ автомашин/ч. Свободный поток и синхронизованный поток обозначены соответственно как “свободный” и “синхронизованный”. Остальные параметры модели такие же, как и на рис. 5.9 (а).

переход к плотному потоку, в то время как в других реализациях при тех же самых параметрах транспортного потока никакого перехода нет. Это справедливо как для транспортного потока с медленными автомобилями, так и без них (рис. 5.9 (б)).

- (ii) Как и в эмпирических данных, в численной модели транспортного потока (Глава 3) широкий движущийся кластер может индуцировать переход из метастабильного свободного потока к плотному потоку на узком месте автодороги (рис. 5.10).
- (iii) Спонтанный и индуцированный переходы к плотному потоку отличаются различными источниками локальных возмущений конечной амплитуды, приводящих к переходу. Однако, в обоих случаях причиной перехода к плотному потоку является метастабильность свободного потока вблизи узкого места относительно $F \rightarrow S$ перехода.
- (iv) После того, как переход от свободного к плотному потоку произошел, качественные свойства возникшего синхронизованного потока не зависят ни от источника возмущений в случае спонтанного перехода (имеется ли медленная машина в свободном потоке (рис. 5.11) или нет (рис. 5.12)), ни от характеристик широкого движущегося кластера в случае индуцированного $F \rightarrow S$ перехода (рис. 5.10). В частности, в синхронизованном потоке, который появляется сразу после перехода, величина потока почти такая же, как и в свободном потоке непосредственно перед переходом ($x = 10.4$ км и $x = 9.2$ км на рис. 5.11, 5.12 и 5.10 (б)). Это важное отличие фазы синхронизованного потока от фазы широкого движущегося кластера, в которой величина потока значительно меньше, чем в свободном потоке впереди и позади кластера.

5.2.4. Анализ модельных траекторий автомашин в транспортном потоке с движущимся узким местом из-за медленной автомашины на двухполосной автодороге с узким местом из-за въезда

В данном параграфе проводится анализ модельных траекторий автомашин в транспортном потоке с движущимся узким местом из-за медленной автомашины на двухполосной автодороге с узким местом из-за въезда, результаты которого использовались выше в § 5.2.2.

5.2.4.1. Влияние эффекта смены полосы на увеличение потока в окрестности движущегося узкого места

Для обгона медленно движущейся автомашины легковые машины, которые сначала двигались по правой полосе, при приближении к медленно движущейся автомашине переходят на левую полосу. Эта постоянная смена полосы автомашинами с правой полосы на левую вызывает увеличение плотности и, соответственно, потока на левой полосе поблизости от медленно движущейся автомашины. В результате возникает волна увеличенного потока, которая движется со скоростью v_M медленной автомашины (рис. 5.8 (б)). Кроме того, из-за постоянной смены полосы с правой на левую вблизи медленно движущейся автомашины возникает волна пониженной скорости на левой полосе. Временные зависимости скорости, величины потока, и плотности на левой полосе внутри волны (рис. 5.8 (в-д)), измеренные неподвижным виртуальным детектором, подтверждают эти выводы о свойствах волны, бегущей за медленной автомашиной в свободном потоке.

Чтобы обогнать медленную автомашину (движущееся узкое место), легковые машины, которые сначала двигались по правой полосе, при приближении к медленно движущейся автомашине стремятся перейти на левую полосу (стрелки вверх $R \rightarrow L$ для автомашин 1 и 2 на рис. 5.13) в пределах расстояния L_c , на котором водители распознают медленно движущуюся автомашину впереди. После обгона медленной автомашины, большинство из этих автомашин возвращается на правую полосу (стрелки вниз $L \rightarrow R$

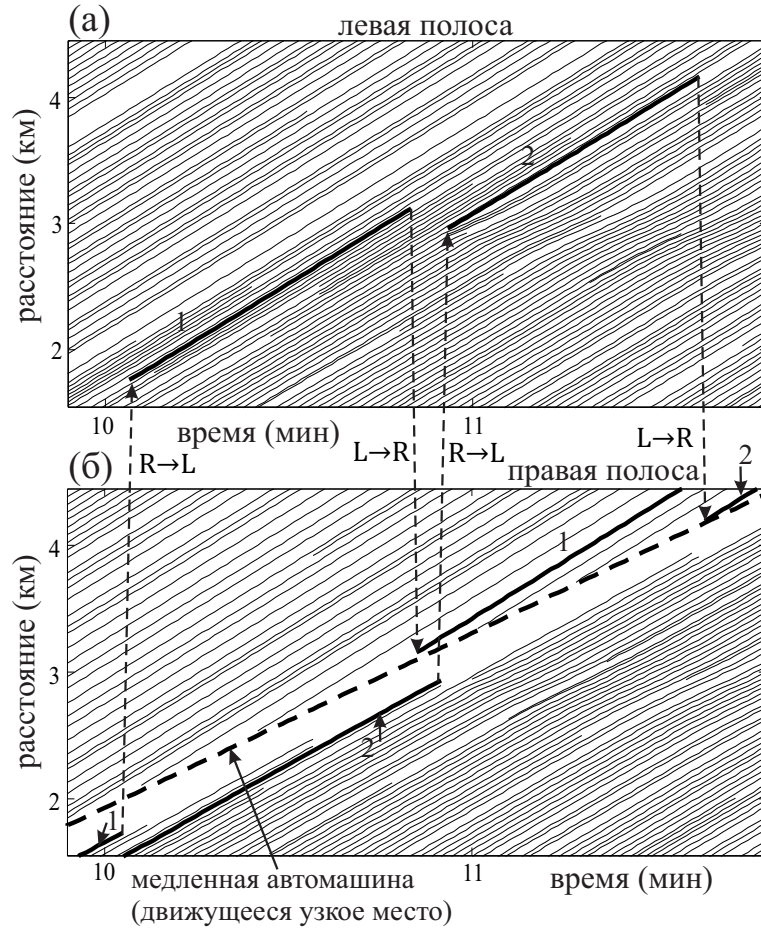


Рис. 5.13: Фрагмент модельных траекторий автомашин в последовательности $R \rightarrow L \rightarrow R$ смены полосы в окрестности медленной автомашины (движущегося узкого места), относящийся к результатам численного моделирования, показанным на рис. 5.8: (а) – левая полоса, (б) – правая полоса.

для автомашин 1 и 2 на рис. 5.13). Эта последовательность $R \rightarrow L \rightarrow R$ смены полосы приводит к увеличению потока на левой полосе в окрестности медленной автомашины (рис. 5.8 (б)).

5.2.4.2. Микроскопическая структура постоянного локального возмущения скорости на узком месте из-за въезда на автодорогу

Существует постоянное локальное возмущение скорости на узком месте из-за въезда на автодорогу (рис. 5.8 (а)). Действительно, если поток по основной дороге q_{in} (рис. 5.8) достаточно большой, то из-за въезда автома-

шины с полосы въезда на правую полосу основной дороги (автомашина “p” на рис. 5.14 (a)), ближайшая автомашина позади на правой полосе должна тормозить (автомашина 3 на рис. 5.14 (a–в)). Это торможение автомашины 3 вынуждает следующие за ней автомашины 4 и 5 также понижать скорость. В результате возникает локальное возмущение скорости вблизи въезда на автодорогу (рис. 5.8 и 5.14 (a–в)). Хотя минимальная скорость внутри этого возмущения может возрастать в течение времени (автомашины 3–5 на рис. 5.14 (б, в)), в среднем возмущение сохраняется, поскольку последующие автомашины, въезжающие на основную дорогу с полосы въезда (автомашина “m” на рис. 5.14 (a)) опять приводят к торможению автомашин, едущих по основной дороге (автомашина 6 на рис. 5.14 (a–в)), и т.д.

Постоянное локальное возмущение скорости существует также и на левой полосе (автомашина 7 на рис. 5.14 (г–е)). Это возмущение возникает из-за того, что автомашины, которые тормозят в пределах локального возмущения на правой полосе, могут переходить на левую полосу, как показано на примере автомашины 8 (смена полосы автомашины 8 показана стрелкой, обозначенной как R→L на рис. 5.14 (a, г)). Из-за этой смены полосы автомашина 9 на левой полосе вынуждена тормозить даже к меньшей скорости, чем скорость автомашины 8. Такая смена с правой полосы на левую поддерживает постоянное локальное возмущение скорости на левой полосе (автомашины 9–11 на рис. 5.14 (г–е)).

5.2.4.3. Микроскопические особенности взаимодействия между волной в свободном потоке позади медленной автомашины и постоянным локальным возмущением скорости на узком месте из-за въезда на автодорогу

Особенности взаимодействия между волной в свободном потоке позади медленной автомашины и постоянным локальным возмущением скорости на узком месте из-за въезда на автодорогу можно видеть на примере траекторий автомашин, показанных на рис. 5.15. Сначала, в пределах области постоянного возмущения вблизи въезда на автодорогу ($x_{\text{он}} \leq x \leq x_{\text{он}}^{(e)}$ на

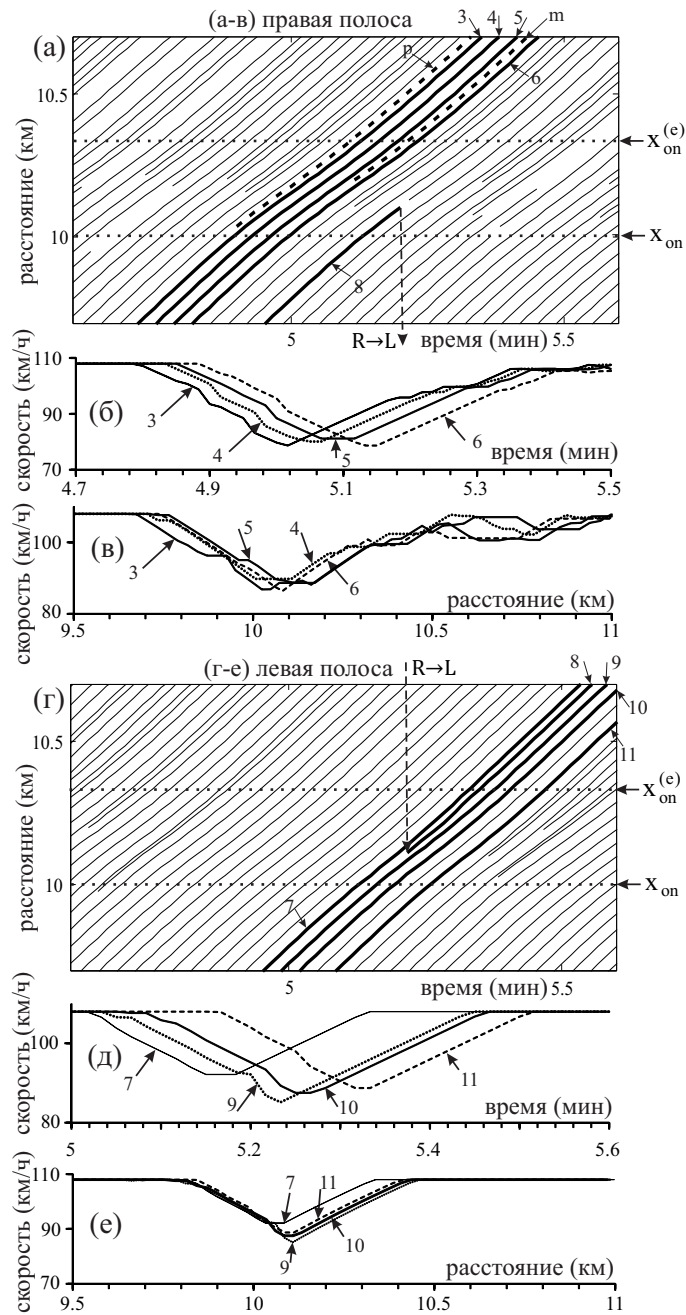


Рис. 5.14: Численное моделирование постоянного локального возмущения в виде области пониженной скорости в свободном потоке на узком месте из-за въезда на автодорогу, относящееся к рис. 5.8: (а-в) – фрагмент модельных траекторий автомашин на правой полосе (а) и скорость автомашин (б, в) вдоль выбранных траекторий как функция времени (б) и координаты (в), при этом нумерация автомашин на (б, в) такая же, как и на (а); (г-е) – фрагмент модельных траекторий автомашин на левой полосе (г) и скорость автомашин (д, е) вдоль выбранных траекторий как функция времени (д) и координаты (е), при этом нумерация автомашин на (д, е) такая же, как и на (г).

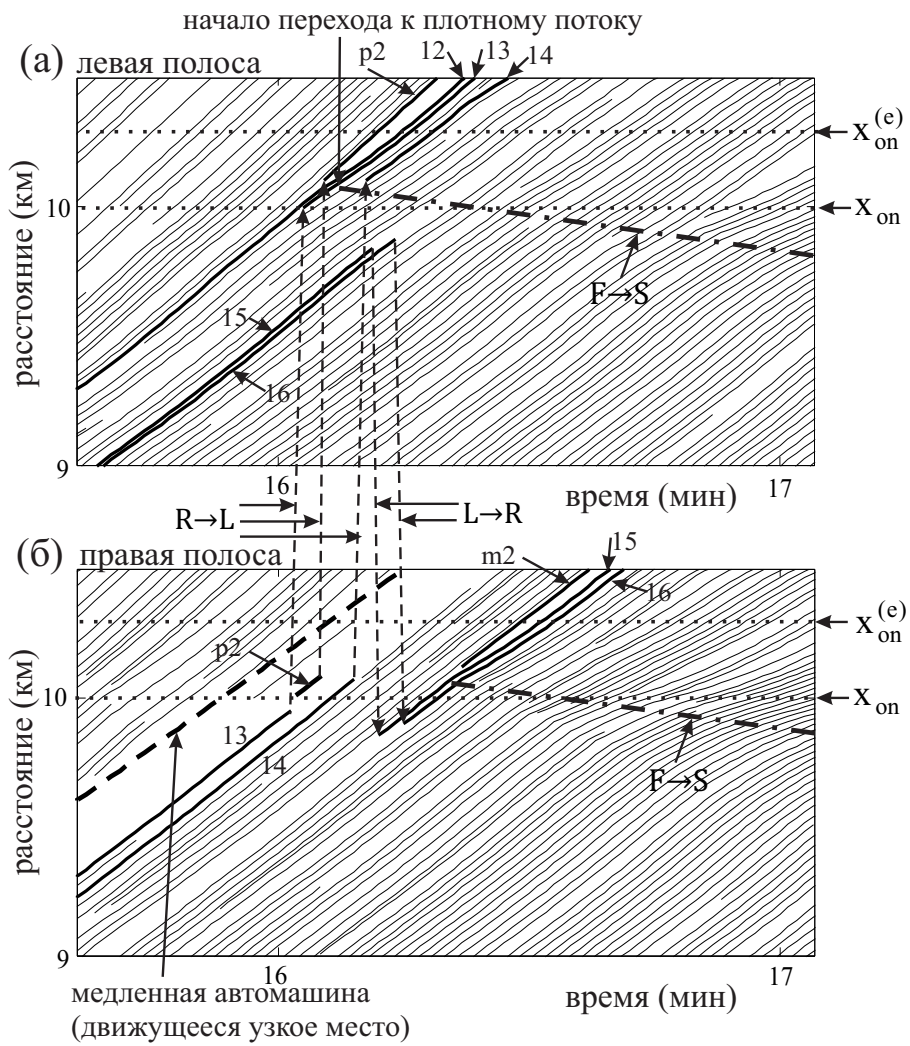


Рис. 5.15: Фрагмент модельных траекторий автомашин, относящихся к рис. 5.8: (а) – левая полоса, (б) – правая полоса.

рис. 5.15), автомашина “p2” въезжает с полосы въезда на правую полосу основной дороги, и затем эта автомашина быстро переходит на левую полосу (стрелка вверх $R \rightarrow L$ для автомашины “p2” на рис. 5.15). В этот момент проходит волна свободного потока за медленной автомашиной. Из-за повышенной величины потока и плотности автомашин на левой полосе внутри этой волны (§ 5.2.4.1), после перехода автомашины “p2” на левую полосу следующие за ней автомашины 12–14 на левой полосе должны сильно тормозить. В результате этого торможения возникает возмущение скорости, которое затем приводит к переходу к синхронизованному потоку. Этот синхронизованный поток сначала возникает на левой полосе, а его передний фронт распространяется против потока (штрих-пунктирная линия, обозначенная как $F \rightarrow S$ на рис. 5.15 (а)).

Автомашины 15 и 16, подъезжая к этому фронту синхронизованного потока, переходят на правую полосу (стрелка вниз $L \rightarrow R$ для автомашин 15 и 16 на рис. 5.15). Однако, автомашины 15 и 16 должны тормозить из-за автомашины “m2”, которая въезжает непосредственно перед ними с полосы въезда на правую полосу. Это торможение приводит к возникновению синхронизованного потока уже на правой полосе, а его передний фронт также начинает распространяться в направлении против потока (штрих-пунктирная линия, обозначенная как $F \rightarrow S$ на рис. 5.15 (б)).

5.3. Вычислительный эксперимент по моделированию сложного гетерогенного транспортного потока

В разработанном в диссертации комплексе программ стохастическая трехфазная модель одинаковых автомашин Главы 3 была расширена на более реалистичный случай гетерогенного потока, в котором автомашины имеют разные параметры и водители показывают разный стиль вождения [149]. Хотя в модели гетерогенного транспортного потока предполагается, что для всех автомашин используются одинаковые правила движения, некоторые модельные функции и параметры в этих правилах различны для

разных типов автомашин. В частности, автомашины разных типов могут иметь разную длину, разную скорость движения в свободном потоке, а также разные временные задержки в различных ситуациях во время движения в транспортном потоке. В модели разные типы автомашин характеризуются специальным идентификатором $j = 1, 2, \dots, H$, где H – это полное число разных типов автомашин ($H > 1$).

Для используемой в комплексе программ модели гетерогенного транспортного потока, включающего, в частности, легковые автомашины и грузовики, был разработан алгоритм для моделирования взаимодействия между автомашинами при смене полосы при въезде машин на скоростную автодорогу и съезде с нее. Алгоритм обеспечивает плавную динамику транспортного потока вблизи въездов и съездов, в частности, отсутствие нереалистично резких торможений.

Формулы для правил движения автомашин, использованные в модели одинаковых автомашин (Глава 3), применяются и для модели гетерогенного потока, при этом модельные параметры, отвечающие за индивидуальные характеристики автомашины, определяются идентификатором для типа автомашины $j = 1, 2, \dots, H$. Например, в модели гетерогенного потока в правилах (3.2)–(3.7), (3.9), (3.10) скорость автомашин в свободном потоке v_{free} , длина автомашины d , коэффициент k в формуле для расстояния синхронизации G_n определяются как

$$v_{\text{free}} = v_{\text{free}}^{(j)}, \quad j = 1, 2, \dots, H, \quad (5.2)$$

$$d = d^{(j)}, \quad j = 1, 2, \dots, H, \quad (5.3)$$

$$k = k^{(j)}, \quad j = 1, 2, \dots, H. \quad (5.4)$$

Аналогичным образом, все другие модельные параметры, которые описывают индивидуальные задержки водителя, индивидуальные особенности при смене полосы, въезде на автодорогу и съезде с нее, и т.п., определяются идентификатором для типа автомашины $j = 1, 2, \dots, H$, как показано в примерах (5.2)–(5.4).

В модели гетерогенного потока, идентификатор типа j и соответству-

ющие параметры приписывались к данной автомашине как ее индивидуальные “атрибуты”, когда автомашина генерировалась в начале дороги (§ 3.2.5).

Чтобы показать, что микроскопическая стохастическая трехфазная модель транспортного потока одинаковых автомашин (Глава 3) может быть легко расширена на гетерогенный поток, ниже рассматривается случай гетерогенного потока, в котором имеется три типа автомашин: “быстрые” и “медленные” легковые автомашины, а также “длинные” грузовые автомашины. Длина быстрых и медленных легковых автомашин существенно меньше длины грузовых автомашин. Максимальная скорость в свободном потоке быстрых автомашин существенно выше, чем для медленных и грузовых автомашин. Имеются также другие параметры, различные для этих трех типов автомашин. Идентификатор j выбирается как $j = 1$ для быстрых, $j = 2$ для медленных, и $j = 3$ для грузовых автомашин. Все модельные параметры, которые выбираются разными для трех типов автомашин, обозначаются верхним индексом (j), где $j = 1, 2, 3$. Процент быстрых автомашин $\eta^{(1)}$, медленных автомашин $\eta^{(2)}$, и длинных автомашин $\eta^{(3)}$ в гетерогенном потоке удовлетворяет очевидному соотношению:

$$\eta^{(1)} + \eta^{(2)} + \eta^{(3)} = 100\%. \quad (5.5)$$

Чтобы принять во внимание различные типы автомашин в гетерогенном транспортном потоке, в модели одинаковых автомашин Главы 3 были сделаны изменения, описанные в следующих параграфах.

5.3.1. Правила движения автомашин на одной полосе в гетерогенном транспортном потоке

5.3.1.1. Стационарные состояния и правила движения

Формулы (3.2)–(3.7), (3.9), (3.10), (3.11)–(3.19), (3.20), (3.21), (3.23)–(3.26) являются также общими правилами движения автомашин в модели гетерогенного транспортного потока. Однако, в гетерогенном потоке с тремя типами автомашин скорость автомашин в свободном потоке v_{free} в (3.2),

(3.4) задается в соответствии с формулой (5.2)

$$v_{\text{free}} = v_{\text{free}}^{(j)}, \quad j = 1, 2, 3, \quad (5.6)$$

где $v_{\text{free}}^{(1)}$, $v_{\text{free}}^{(2)}$ и $v_{\text{free}}^{(3)}$ либо постоянные величины (таблица 5.2), либо являются функциями расстояния между автомашинами (см. § 5.3.4). В этом гетерогенном потоке, согласно (5.3) длина автомашины d зависит от ее типа

$$d = d^{(j)}, \quad j = 1, 2, 3, \quad (5.7)$$

где $d^{(1)}$, $d^{(2)}$, и $d^{(3)}$ постоянные величины (см. таблицу 5.2).

Расстояние g_n (3.7) в гетерогенном потоке определяется как

$$g_n = x_{\ell, n} - x_n - d_\ell, \quad (5.8)$$

где длина автомашины впереди d_ℓ зависит от типа этой автомашины.

Расстояние синхронизации G_n в (3.5) определяется формулами (3.9), (3.10), где согласно (5.4) величина k в (3.10) различна для разных типов автомашин

$$k = k^{(j)}, \quad j = 1, 2, 3, \quad (5.9)$$

$k^{(1)}$, $k^{(2)}$, и $k^{(3)}$ – постоянные (см. таблицу 5.2).

Двухмерная область стационарных состояний модели на плоскости поток–плотность для транспортного потока, в котором либо все автомашины имеют тип “быстрые”, либо все автомашины имеют тип “медленные”, либо все автомашины имеют тип “длинные”, показаны соответственно на рис. 5.16 (а), (б), и (в).

5.3.1.2. Флуктуации

Случайное ускорение и торможение автомашины описываются выражениями (3.11), (3.13)–(3.19). Однако, в гетерогенном потоке вероятности p_b и p_a в (3.13) и (3.15) зависят от типа автомашины

$$p_b = p_b^{(j)}, \quad j = 1, 2, 3, \quad (5.10)$$

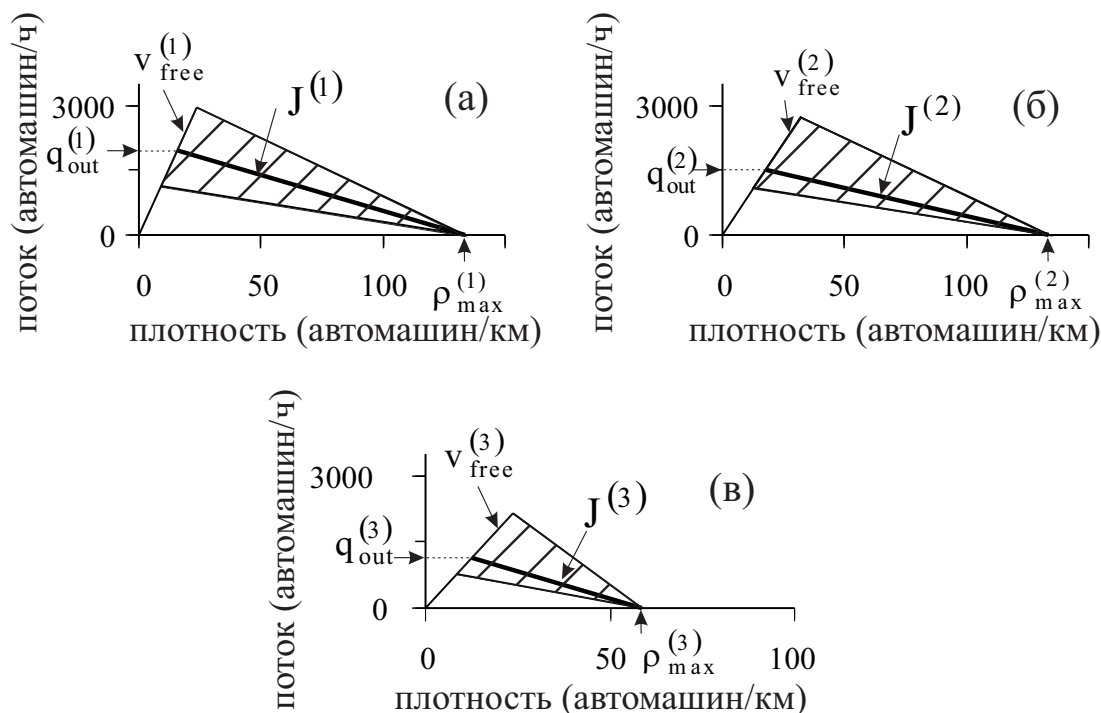


Рис. 5.16: Стационарных состояний модели и линия J для следующих случаев: (а) – все автомашины имеют тип “быстрые” (линия J отвечает линии $J^{(1)}$); (б) – все автомашины имеют тип “медленные” (линия J отвечает линии $J^{(2)}$); (в) – все автомашины имеют тип “длинные” (линия J отвечает линии $J^{(3)}$). Величина выходного потока из широкого движущегося кластера и скорость заднего фронта такого кластера равны соответственно $q_{\text{out}}^{(1)} = 1900$ автомашин/ч и $v_g^{(1)} = -16.2$ км/ч для быстрых автомашин, $q_{\text{out}}^{(2)} = 1510$ автомашин/ч и $v_g^{(2)} = -13$ км/ч для медленных автомашин, $q_{\text{out}}^{(3)} = 1130$ автомашин/ч и $v_g^{(3)} = -24.5$ км/ч для длинных автомашин. $\rho_{\text{max}}^{(1)}$, $\rho_{\text{max}}^{(2)}$, и $\rho_{\text{max}}^{(3)}$ – это плотность внутри широкого движущегося кластера соответственно для быстрых автомашин, медленных автомашин, и длинных автомашин.

$$p_a = p_a^{(j)}, \quad j = 1, 2, 3. \quad (5.11)$$

Более того, в (3.18)

$$p_0(v) = p_0^{(j)}(v), \quad j = 1, 2, 3, \quad (5.12)$$

$$p_0^{(1)}(v) > p_0^{(2)}(v) > p_0^{(3)}(v). \quad (5.13)$$

Средняя временные задержки при ускорении автомашин разных типов

$$\tau_{\text{del}}^{(\text{acc})}(v) = \tau_{\text{del}}^{(\text{acc}, j)}(v), \quad j = 1, 2, 3 \quad (5.14)$$

равны

$$\tau_{\text{del}}^{(\text{acc}, j)}(v) = \frac{\tau}{p_0^{(j)}(v)}, \quad j = 1, 2, 3, \quad (5.15)$$

$$\tau_{\text{del}}^{(\text{acc}, 1)}(v) < \tau_{\text{del}}^{(\text{acc}, 2)}(v) < \tau_{\text{del}}^{(\text{acc}, 3)}(v). \quad (5.16)$$

Согласно (5.16), предполагается, что быстрые автомашины имеют более короткую задержку при начале ускорения, чем медленные автомашины и длинные автомашины, т.е. быстрые автомашины показывают более агрессивное вождение.

5.3.1.3. Безопасная скорость

В формулах (3.20), (3.21), (3.23)–(3.26) для безопасной скорости $v_{s,n}$, а также в других формулах в § 3.2.4, расстояние между автомашинами g_n в гетерогенном потоке задается выражением (5.8).

5.3.2. Правила смены полосы в модели гетерогенного транспортного потока на двухполосной автодороге

Как и § 3.3, правила смены полосы в двухполосной модели гетерогенного потока базируются на условиях для намерения сменить полосу и условиях для безопасной смены полосы.

Условия для намерения водителя сменить полосу с правой на левую ($R \rightarrow L$) и с левой на правую ($L \rightarrow R$) в модели гетерогенного потока выбирались следующим образом:

$$R \rightarrow L : v_n^+ \geq v_{\ell,n} + \delta_1 \text{ and } v_n \geq v_{\ell,n}, \quad (5.17)$$

$$L \rightarrow R : v_n^+ > v_{\ell,n} + \delta_2 \text{ or } v_n^+ > v_n + \delta_2, \quad (5.18)$$

где

$$\delta_1 < \delta_2 \quad \text{для быстрых автомашин}, \quad (5.19)$$

$$\delta_2 < \delta_1 \quad \text{для медленных и для длинных автомашин}, \quad (5.20)$$

$\delta_1 \geq 0, \delta_2 \geq 0$ – постоянные (см. таблицу 5.3).

Предполагалось, что если скорость по правой полосе достаточно велика, то медленные легковые автомашины и длинные (грузовые) автомашины, движущиеся по левой полосе, обычно вынуждены переходить на правую полосу, тогда как медленные автомашины и длинные автомашины на правой полосе остаются на этой полосе. Чтобы смоделировать этот эффект, применялись следующие условия для намерения сменить полосу для медленных автомашин и для длинных автомашин. Для смены полосы с левой на правую ($L \rightarrow R$): условие (5.18) или

$$L \rightarrow R : v_n^+ > v_{\text{free}}^{(j)} - \delta_0, \quad j = 2, 3. \quad (5.21)$$

Для смены полосы с правой на левую: условие (5.17) и

$$R \rightarrow L : v_{\ell,n} \leq v_{\text{free}}^{(j)} - \delta_0, \quad j = 2, 3. \quad (5.22)$$

где $\delta_0 > 0$ – постоянная (см. таблицу 5.3).

Условия для безопасной смены полосы задавались неравенствами (3.32), (3.33), в которых g_n^+ и g_n^- вычислялись как

$$g_n^+ = x_n^+ - x_n - d^+, \quad g_n^- = x_n - x_n^- - d, \quad (5.23)$$

d^+ – длина ближайшей автомашины впереди на соседней полосе, длина

автомашины d задавалась формулой (5.7).

При выполнении условий для намерения сменить полосу и условий для безопасной смены полосы, аналогично работе Rickert *и др.* [273], автомашина меняет полосу с вероятностью $p_c < 1$ ($p_c = 1$ для условия (5.21)).

Медленные автомашины и длинные автомашины могут переходить с левой полосы на правую, даже если условия безопасности (3.32), (3.33) не выполнены, но выполнено условие (5.21) для вынужденного перехода на правую полосу. В этом случае применяются следующие условия безопасности:

(i) Расстояние между ближайшими соседними автомашинами на соседней правой полосе превышает величину $g_{\text{target}}^{(\text{min})}$, т.е.,

$$x_n^+ - x_n^- - d^+ > g_{\text{target}}^{(\text{min})}. \quad (5.24)$$

(ii) Автомашина на шаге n проходит среднюю точку

$$x_n^{(\text{m})} = \lfloor (x_n^+ + x_n^- + d - d^+)/2 \rfloor \quad (5.25)$$

между ближайшими соседними автомашинами на правой полосе, т.е.,

$$\begin{aligned} x_{n-1} < x_{n-1}^{(\text{m})} \quad \text{and} \quad x_n \geq x_n^{(\text{m})} \\ \text{or} \\ x_{n-1} \geq x_{n-1}^{(\text{m})} \quad \text{and} \quad x_n < x_n^{(\text{m})}. \end{aligned} \quad (5.26)$$

В (5.24)

$$g_{\text{target}}^{(\text{min})} = \lfloor \lambda v_n^+ + d \rfloor, \quad (5.27)$$

$$\lambda = \lambda^{(j)}, \quad j = 2, 3, \quad (5.28)$$

$\lambda^{(2)}$ и $\lambda^{(3)}$ – постоянные (см. таблицу 5.3). Если в соответствии с (5.21), (5.24)–(5.27) автомашина меняет полосу, то ее координата после смены полосы устанавливается равной $x_n = x_n^{(\text{m})}$. Данные условия безопасности облегчают переход с левой полосы на правую для медленных и для длинных автомашин, если условия (3.32), (3.33) не выполняются.

Как известно [190], две медленные и/или длинные автомашины, еду-

щие рядом на левой и правой полосах, препятствуют движению быстрых автомашин на двухполосной автодороге. Чтобы избежать этого эффекта, в модели гетерогенного потока предполагалось, что медленная или длинная автомашина на левой полосе, которая должна переходить на правую полосу, может двигаться с немного более высокой скоростью в свободном потоке, прежде чем она перейдет на правую полосу. С этой целью, когда было выполнено условие (5.21), скорость v_{free} в (3.2), (3.4) для медленных автомашин и для длинных автомашин на левой полосе равнялась соответственно

$$v_{\text{free}}^{(2, \text{left})} > v_{\text{free}}^{(2)} \quad (5.29)$$

и

$$v_{\text{free}}^{(3, \text{left})} > v_{\text{free}}^{(3)} \quad (5.30)$$

где $v_{\text{free}}^{(2, \text{left})}$ и $v_{\text{free}}^{(3, \text{left})}$ – постоянные (см. таблицу 5.3).

5.3.3. Граничные и начальные условия и модели узких мест на автодороге

Как и в § 3.2.5, в модели гетерогенного потока применялись открытые граничные условия. Однако, в соответствующих формулах длина d заменялась на длину автомашины впереди d_ℓ . В начальном состоянии ($n = 0$) все автомашины имели соответствующие скорости свободного потока $v_n = v_{\text{free}}^{(j)}$, $j = 1, 2, 3$ и располагались на расстояниях друг от друга $x_{\ell, n} - x_n = v_{\text{free}}^{(j)} \tau_{\text{in}}$, $j = 1, 2, 3$.

Как упоминалось выше, идентификатор j для типа автомашины и соответствующие параметры автомашины являлись индивидуальными “атрибутами”, которые приписывались каждой новой автомашине, когда она генерировалась в начале автодороги. Использовались две различные возможности для генерации новых автомашин различных типов в начале автодороги:

- (i) Быстрые, медленные и длинные автомашины генерировались случайным образом как на левой, так и на правой полосах в зависимости

от величины потока q_{in} и процента автомашин различных типов $\eta^{(1)}$, $\eta^{(2)}$ и $\eta^{(3)}$.

- (ii) Быстрые автомашины генерировались преимущественно на левой полосе, тогда как медленные и длинные автомашины генерировались преимущественно на правой полосе.

В случае (ii), только процент $\max(0, 2\eta^{(1)} - 100\%)$ быстрых автомашин генерировался случайно на правой полосе, тогда как только процент $\max(0, 2\eta^{(2)} + 2\eta^{(3)} - 100\%)$ медленных и длинных автомашин генерировался случайно на левой полосе.

В гетерогенном потоке модели узких мест на автодороге описываются формулами параграфа 3.4. Однако, в условия безопасной смены полосы (3.42) расстояния g_n^+ и g_n^- определяются формулами (5.23). В свою очередь, формулы (3.44) и (3.46) соответственно имеют вид

$$x_n^+ - x_n^- - d^+ > g_{\text{target}}^{(\min)} \quad (5.31)$$

и

$$x_n^{(m)} = \lfloor (x_n^+ + x_n^- + d - d^+)/2 \rfloor, \quad (5.32)$$

где d и d^+ задаются формулой (5.7).

5.3.4. Реалистичный гетерогенный транспортный поток на трехполосной автомагистрали

5.3.4.1. Зависимость скорости автомашин в свободном потоке от расстояния между автомашинами

Для численного моделирования наблюдаемого эмпирически гетерогенного транспортного потока на трехполосной автомагистрали, использовался известный эмпирический факт, что скорость автомашин в свободном потоке зависит от плотности потока. Чтобы смоделировать такую зависимость,

Таблица 5.2: Параметры для правил движения автомашин на одной полосе, часто используемые для численного моделирования гетерогенного потока. Остальные параметры такие же, как и в таблице 3.1

$$\begin{aligned}
 v_{\text{free}}^{(1)} &= 33.3 \text{ мс}^{-1} / \delta v \text{ (120 км/ч)}, \\
 v_{\text{free}}^{(2)} &= v_{\text{free}}^{(3)} = 25 \text{ мс}^{-1} / \delta v \text{ (90 км/ч)}, \\
 d^{(1)} &= d^{(2)} = 7.5 \text{ м} / \delta x, \quad d^{(3)} = 17 \text{ м} / \delta x, \\
 k^{(1)} &= k^{(2)} = 3, \quad k^{(3)} = 4, \\
 p_{\text{a}}^{(1)} &= p_{\text{a}}^{(2)} = 0.17, \quad p_{\text{a}}^{(3)} = 0.3, \\
 p_{\text{b}}^{(1)} &= p_{\text{b}}^{(2)} = 0.1, \quad p_{\text{b}}^{(3)} = 0.2, \\
 p_0^{(1)}(v) &= 0.6 + 0.17 \min(1, v/v_{01}), \\
 p_0^{(2)}(v_n) &= 1 - 1.3(1 - p_0^{(1)}(v_n)), \\
 p_0^{(3)}(v_n) &= 1 - 1.5(1 - p_0^{(1)}(v_n)), \\
 v_{01} &= 10 \text{ мс}^{-1} / \delta v, \quad a^{(b)} = a.
 \end{aligned}$$

Таблица 5.3: Параметры смены полосы, часто используемые для численного моделирования гетерогенного потока. Остальные параметры такие же, как и в таблице 3.2

$$\begin{aligned}
 \delta_1 &= 1 \text{ мс}^{-1} / \delta v, \quad \delta_2 = 3.5 \text{ мс}^{-1} / \delta v \text{ для быстрых автомашин,} \\
 \delta_1 &= 3.5 \text{ мс}^{-1} / \delta v, \quad \delta_2 = 1 \text{ мс}^{-1} / \delta v \text{ для медленных} \\
 &\text{и для длинных автомашин,} \\
 \delta_0 &= 6 \text{ мс}^{-1} / \delta v, \quad \lambda^{(2)} = \lambda^{(3)} = 0.8, \\
 v_{\text{free}}^{(2, \text{ left})} &= 28.5 \text{ мс}^{-1} / \delta v, \quad v_{\text{free}}^{(3, \text{ left})} = 27.5 \text{ мс}^{-1} / \delta v.
 \end{aligned}$$

скорость автомашин в свободном потоке $v_{\text{free}}(g_n)$ предполагалась функцией расстояния между автомашинами g_n . При этом использовалась либо формула

$$v_{\text{free}}(g_n) = \lfloor \max(v_{\text{free}}^{(\min)}, v_{\text{free}}^{(\max)}(1 + c_1 d / (g_n + d))^{-1}) \rfloor, \quad (5.33)$$

либо формула

$$v_{\text{free}}(g_n) = \lfloor \max(v_{\text{free}}^{(\min)}, v_{\text{free}}^{(\max)}(1 - \kappa d / (d + g_n))) \rfloor, \quad (5.34)$$

где $v_{\text{free}}^{(\min)}$, $v_{\text{free}}^{(\max)}$, κ , и c_1 являются константами, различными для легковых и грузовых автомашин.

Для гетерогенного потока, состоящего из автомашин с различными характеристиками (§ 5.3, функции $v_{\text{free}}(g_n)$ тоже могут быть выбраны различными для разных типов автомашин. Так, для гетерогенного потока с автомашинами разных типов $j = 1, 2, \dots, H$, формула (5.6) примет вид

$$v_{\text{free}}(g_n) = v_{\text{free}}^{(j)}(g_n), \quad j = 1, 2, \dots, H, \quad (5.35)$$

где функции $v_{\text{free}}^{(j)}(g_n)$ и модельные параметры в этих функциях быть выбраны различными для автомашин разных типов $j = 1, 2, \dots, H$.

5.3.4.2. Численное моделирование пространственно-временных структур плотного потока на реальной трехполосной автомагистрали

Модель гетерогенного транспортного потока (§ 5.3 и § 5.3.4.1) использовалась для численного моделирования и анализа реальных эмпирических данных, измеренных в транспортном потоке на трехполосной автомагистрали в Германии (рис. 5.17 (а)). Эти реальные эмпирические данные собирались с помощью двух источников: (i) средние за 1 мин данные дорожных детекторов и (ii) данные скорости отдельных (пробных) автомашин, оборудованных навигационными системами фирмы TomTom (рис. 5.17 (б) и 5.18). Одной из задач этого численного моделирования было изучить качество транспортного сервиса сообщений “предупреждение об опасности” [186]. В этом параграфе представлено дальнейшее развитие

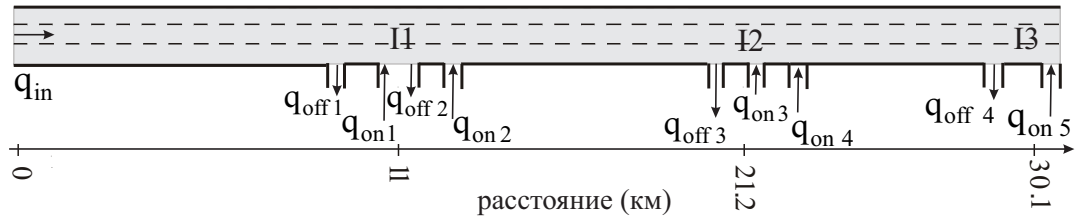
комплекса программ для численного моделирования и анализа реальных эмпирических данных транспортного потока.

В дополнение к разным характеристикам водителей и параметрам автомашин, в реалистичном гетерогенном транспортном потоке часто бывает больше, чем две полосы движения (в одном направлении) на многих автомагистралях. В данном параграфе модель гетерогенного потока обобщена на случай трехполосной автомагистрали с несколькими въездами и съездами. Однако, поскольку в имеющихся реальных данных дорожными детекторами измерялся только процент длинных автомашин, в модели гетерогенного потока использовались только два типа автомашин: легковые и длинные (грузовые). Скорость в свободном потоке как для легковых, так и для длинных автомашин, выбиралась зависящей от расстояния между автомашинами, как показано на рис. 5.19.

Как и в реальном транспортном потоке, в модели трехполосной автомагистрали с въездами и съездами (в местах дорожных развязок, обозначенных как II-III на рис. 5.17 (а)), автомашины въезжают на автомагистраль в начальной точке (при $x = 0$ км) и из въездов, и съезжают с нее в конечной точке ($x = 30.5$ км) и через съезды. В этом открытом процессе движения, все распределения переменных транспортного потока, таких как скорость, величина потока или плотность, на основной дороге в пределах участка $0 < x < 30.5$ км являются *только* результатом численного моделирования транспортного потока при следующих граничных условиях.

- (i) Величина потока как функция времени в начале автодороги (при $x = 0$) берется из измерений дорожного детектора, размещенного в позиции $x = 0$ (рис. 5.17).
- (ii) Величины потоков во въезды как функции времени берутся из измерений дорожных детекторов, размещенных в соответствующих позициях на полосах въездов (рис. 5.17).
- (iii) Величины потоков автомашин, съезжающих с основной дороги через съезды, как функции времени берутся из измерений дорожных детекторов, размещенных в соответствующих позициях на полосах

(а) I1: Friedberg, I2: Bad Homburger Kreuz, I3: Nordwestkreuz



(б) Данные измерений входных и выходных потоков, использованные в численном моделировании

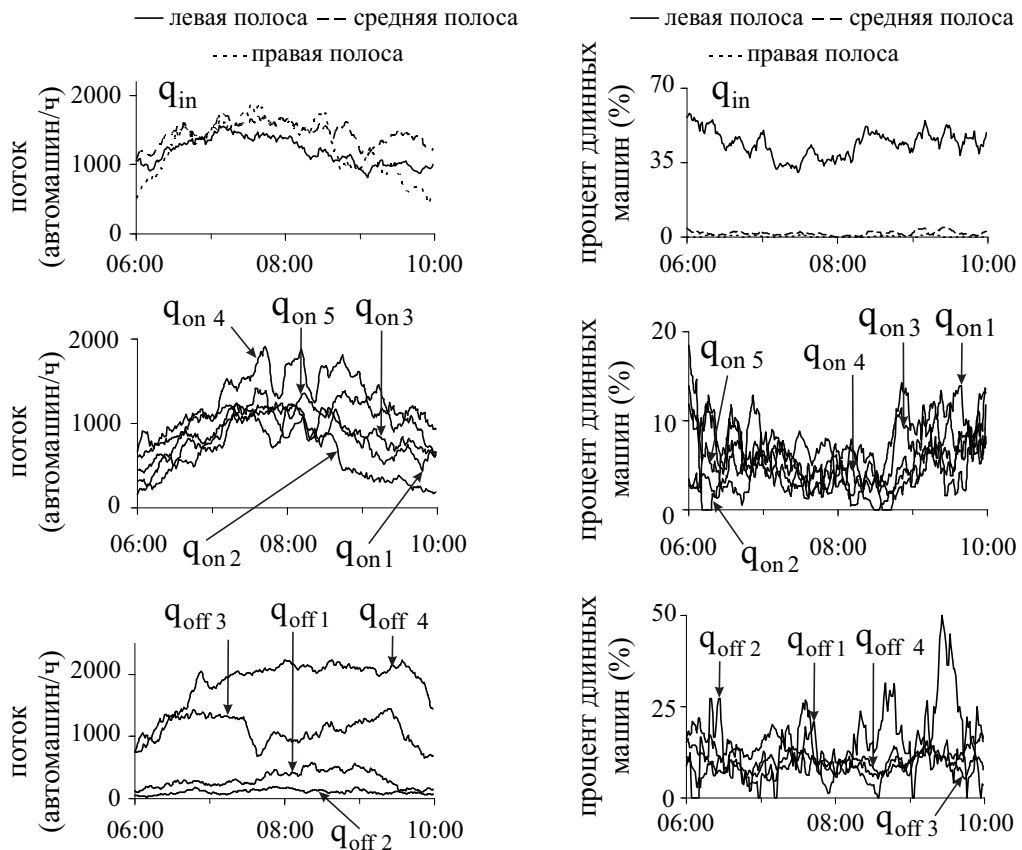


Рис. 5.17: Эмпирические входные и выходные потоки, использованные в численном моделировании: (а) – упрощенная схема участка трехполосной автомагистрали А5-Юг в Германии, для которого имелись данные как от автомашин с навигационной системой фирмы TomTom, так от дорожных детекторов (рис. 5.18), измеренные 10 декабря 2009 года; (б) – измеренные дорожными детекторами временные зависимости входных и выходных потоков (слева) и процента длинных автомашин (справа), использованные в численном моделировании. На (а) координаты въездов на автомагистраль $x_{on\ i}, i = 1, 2, \dots, 5$ соответственно равны 11.085, 11.789, 21.522, 21.86, 30.19 км; координаты съездов с автомагистралью $x_{off\ y}, y = 1, 2, 3, 4$ соответственно равны 10.674, 11.366, 18.612, 27.768 км.

Автоматгистраль A5-South, 10 декабря 2009

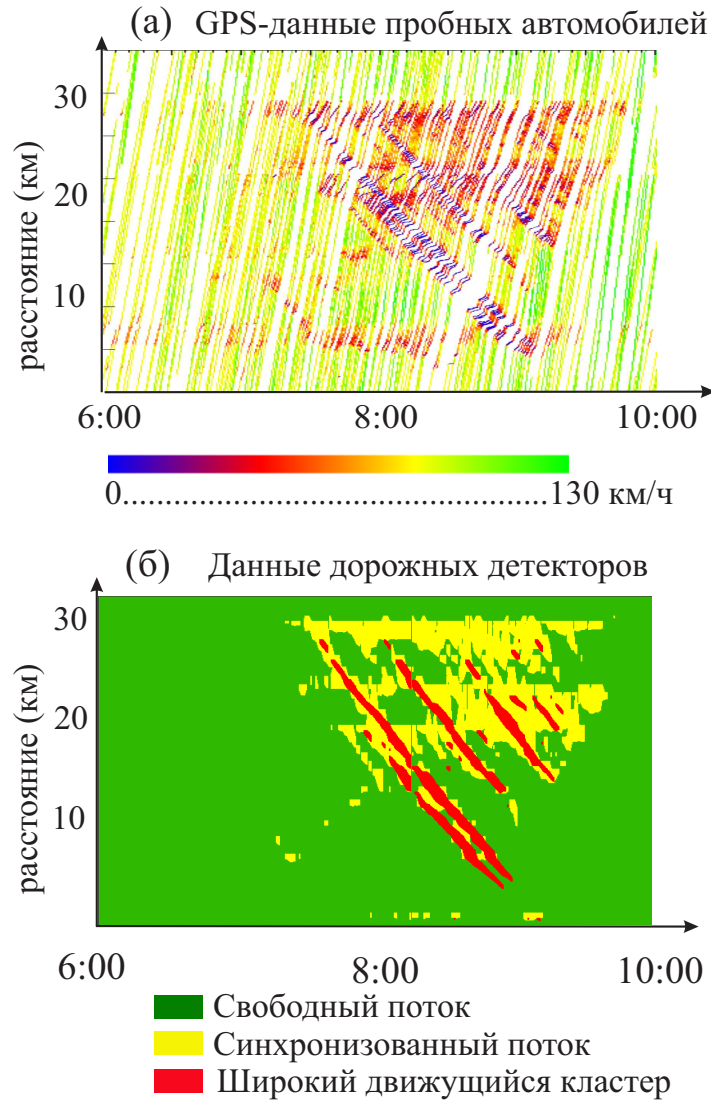


Рис. 5.18: Общий вид GPS данных от автомашин с навигационной системой фирмы TomTom (а) и данных с дорожных детекторов, измеренных 10 декабря 2009 года на участке автомагистрали A5-Юг в Германии (рис. 5.17), когда на этом участке автомагистрали была сложная пространственно-временная структура плотного потока: (а) – траектории автомашин на плоскости координата–время; (б) – три фазы транспортного потока, реконструированные с помощью моделей ASDA и FOTO [123] из реальных данных, измеренных дорожными детекторами.

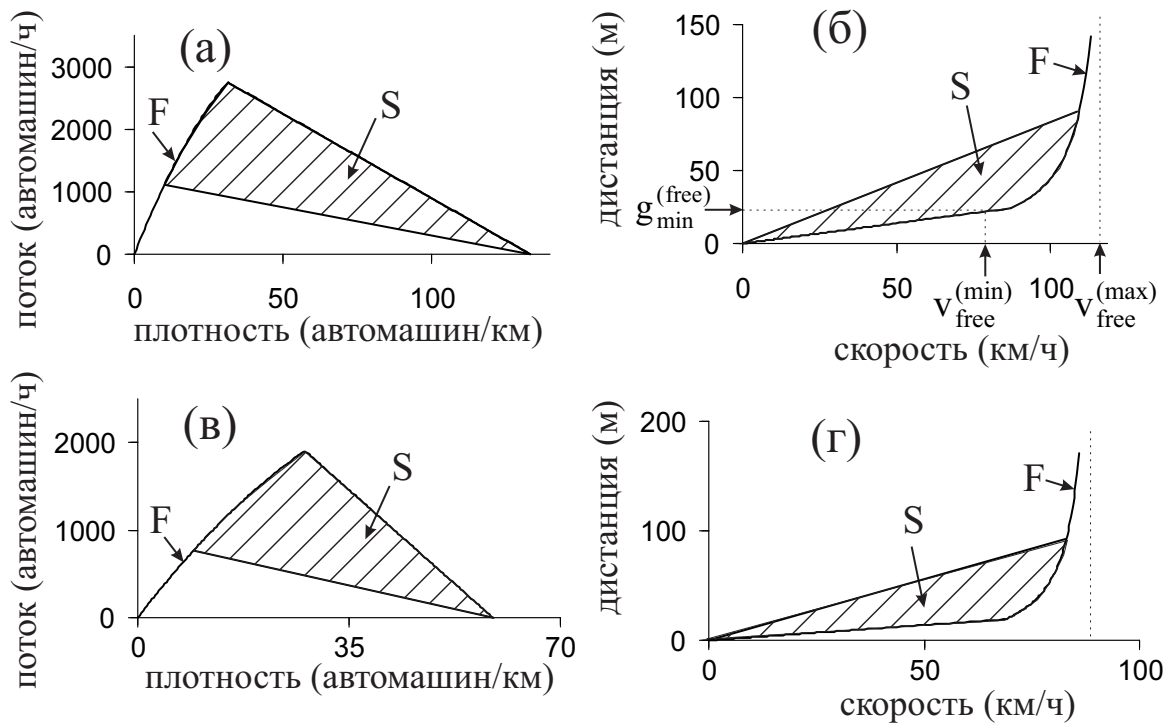


Рис. 5.19: Стационарные состояния модели для легковых (а, б) и длинных (в, г) автомашин, относящиеся к формуле (5.33): (а, в) – стационарные состояния на плоскости поток–плотность, (б, г) – стационарные состояния на плоскости дистанция–скорость. F - свободный поток, S - синхронизованный поток. На (б) $v_{free}^{(max)}$ и $v_{free}^{(min)}$ - это максимальная и минимальная скорости свободного потока для легковых автомашин, $g_{min}^{(free)}$ – это минимальное расстояние между автомашинами в свободном потоке, относящееся к скорости $v_{free}^{(min)}$.

съездов (рис. 5.17).

- (iv) В конечной точке ($x = 30.5$ км) используются условия для свободного движения автомашин за границу моделируемого участка автомагистрали.

В этих граничных условиях величины потоков задавались отдельно для легковых и для длинных автомашин (рис. 5.17 (б)), используя данные измерений о проценте длинных автомашин.

Никакие данные о потоке (скорости или других величинах), измеренные дорожными детекторами на основной дороге в пределах моделируемого участка автострады (при $0 < x < 30.5$ км) не использовались при численном моделировании. Другими словами, моделировалось саморазвитие пространственно-временной структуры транспортного потока на трехполосной автомагистрали при положениях въездов и съездов, соответствующих реальной инфраструктуре, и при значениях потоков во въезды и на съезды, которые были измерены в реальном транспортном потоке в пределах выбранного участка (при $0 < x < 30.5$ км), т.е. между детекторами, расположенными при $x = 0$ и $x = 30.5$ км на основной дороге на границах выбранного участка автомагистрали А5-Юг.

5.3.4.3. Сравнение результатов численного моделирования с реальными данными

Численное моделирование гетерогенного транспортного потока на трехполосной автомагистрали показывает следующие результаты [186]:

1. Как и в использованных реальных данных, в численном моделировании переход от свободного к плотному транспортному потоку – $F \rightarrow S$ переход. $F \rightarrow S$ переход показывает метастабильную природу. Было найдено, что как в реальных данных, так и в численном моделировании, имеется метастабильность свободного потока относительно $F \rightarrow S$ перехода на узких местах автомагистрали.

Таблица 5.4: Модельные параметры, используемые для численного моделирования гетерогенного транспортного потока на трехполосной автомагистрали

<p>Параметры для правил движения автомашин на одной полосе:</p> <p>$\tau = \tau_{\text{safe}} = 1$ с, $d = 7.5\text{м}/\delta x$ для легковых автомашин, $d = 17\text{м}/\delta x$ для длинных автомашин, $\delta x = 0.01$ м, $v_{\text{free}}^{(\text{max})} = 33.33\text{мс}^{-1}/\delta v$, $v_{\text{free, long}}^{(\text{max})} = 25\text{мс}^{-1}/\delta v$, $v_{\text{free}}^{(\text{min})} = 15\text{мс}^{-1}/\delta v$, $c_1 = 1.4$ для легковых автомашин, $c_1 = 0.6$ для длинных автомашин, $b = 1\text{мс}^{-2}/\delta a$, $\delta v = 0.01\text{мс}^{-1}$, $\delta a = 0.01 \text{мс}^{-2}$, $k = 3$, $p_1 = 0.3$, $p_b = 0.15$, $p_a = 0.15$, $a^{(b)}(v_n) = 0.2a +$ $+ 0.8a \max(0, \min(1, (v_{22} - v_n)/\Delta v_{22}))$, $v_{22} = 12.5\text{мс}^{-1}/\delta v$, $\Delta v_{22} = 2.778\text{мс}^{-1}/\delta v$, $p^{(0)} = 0.005$, $p_2(v_n) = 0.48 + 0.32\Theta(v_n - v_{21})$, $p_0(v_n) = 0.52 + 0.23 \min(1, v_n/v_{01})$ для легковых автомашин, $p_0(v_n) = 0.33 + 0.37 \min(1, v_n/v_{01})$ для длинных автомашин, $v_{01} = 10\text{мс}^{-1}/\delta v$, $v_{21} = 15\text{мс}^{-1}/\delta v$, $a = 0.5\text{мс}^{-2}/\delta a$, $a^{(0)} = 0.2a$, $a^{(a)} = 0$.</p>
<p>Параметры смены полосы:</p> <p>$\delta_1 = 1\text{мс}^{-1}/\delta v$ и $\delta_2 = 3.5\text{мс}^{-1}/\delta v$ для легковых автомашин, $\delta_1 = 3.5\text{мс}^{-1}/\delta v$ и $\delta_2 = 1\text{мс}^{-1}/\delta v$ для длинных автомашин, $\delta_0 = 6\text{мс}^{-1}/\delta v$, $L_a = 150\text{м}/\delta x$, $p_c = 0.2$, $\lambda = 0.8$, $\Delta v^{(1)} = 2\text{мс}^{-1}/\delta v$.</p>

Таблица 5.5: Параметры в моделях узких мест из-за въезда и съезда на трехполосной автомагистрали

$\lambda_b = 0.75$ для всех узких мест, кроме съездов
на пересечениях I2 и I3 на рис. 5.17, для этих съездов λ_b
зависела от среднего расстояния между автомашинами на соседней
полосе и менялась от $\lambda_b^{(0)}$ до $\lambda_b^{(1)}$ (формула (A27) в [186])
 $\lambda_b^{(0)} = 0.72$, $\lambda_b^{(1)} = 0.8$ для съезда I2 на рис. 5.17,
 $\lambda_b^{(0)} = 0.65$, $\lambda_b^{(1)} = 0.8$ для съезда I3 на рис. 5.17,
 $\lambda_b = 0.6$ для длинных автомашин на всех въездах и съездах,
 $\lambda_b = 0.65$ для полосы съезда на всех съездах, $c_b = 0.5$,
 L_c для легковых автомашин:
для съезда I3 на рис. 5.17:
 $L_c = 0.3\text{км}/\delta x$ на средней полосе, $L_c = 0.6\text{км}/\delta x$ на левой полосе,
для съездов II и I2 на рис. 5.17:
 $L_c = 0.5\text{км}/\delta x$ на средней полосе, $L_c = 1.0\text{км}/\delta x$ на левой полосе,
для длинных автомашин для всех въездов и съездов:
 $L_c = 1.0\text{км}/\delta x$ на средней полосе, $L_c = 2.0\text{км}/\delta x$ на левой полосе,
 $v_{\text{free off}} = 23.6\text{мс}^{-1}/\delta v$, $L_d = 0.5\text{км}/\delta x$,
 $\Delta v_r^{(2)} = 5\text{мс}^{-1}/\delta v$ для въездов,
 $\Delta v_r^{(2)} = 10\text{мс}^{-1}/\delta v$ для съездов, $\Delta v_r^{(1)} = 10\text{мс}^{-1}/\delta v$,
 $L_s = 0.1\text{км}/\delta x$ на левой полосе, $L_s = 0.05\text{км}/\delta x$ на средней полосе,
 $L_s = 0$ на правой полосе,
 $L_r = 0.2\text{км}/\delta x$ для въездов, $L_r = 0.1\text{км}/\delta x$ для съездов,
длина L_m определялась дорожной инфраструктурой (рис. 5.17 (а))
для въездов длина $L_m, i, i = 1, 2, \dots, 5$
равна соответственно 281, 300, 300, 415, 250 м
для съездов длина $L_m, y, y = 1, 2, 3, 4$
равна соответственно 210, 273, 2150, 1500 м.

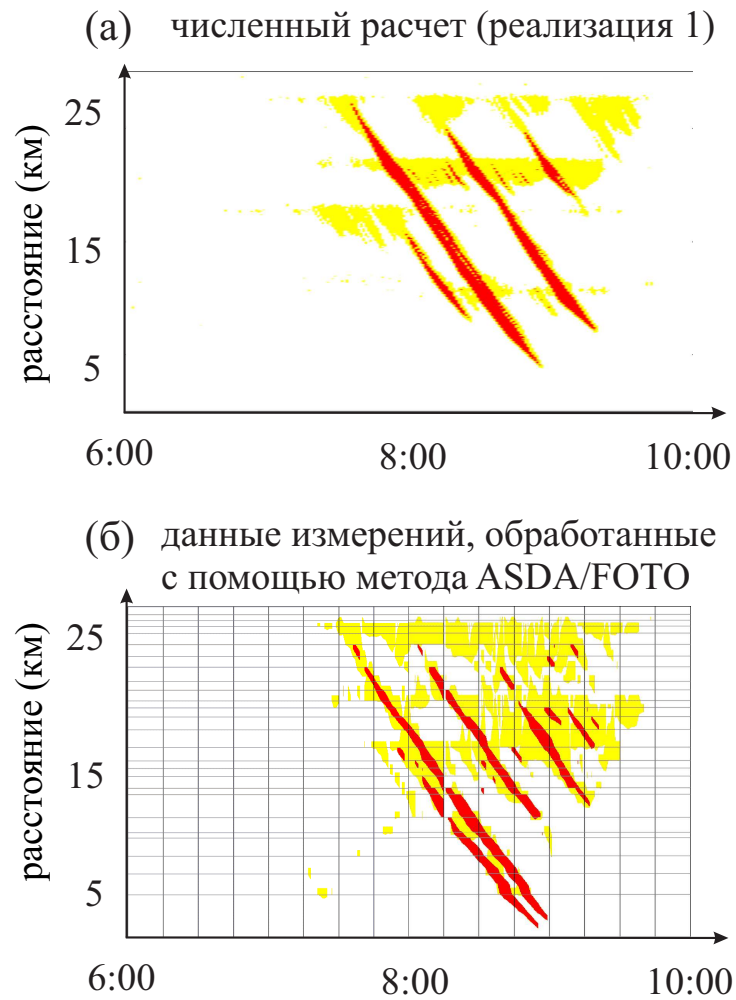


Рис. 5.20: Сравнение реализации 1 при численном моделировании гетерогенного потока (а) с реальными данными измерений, обработанными с помощью ASDA и FOTO методов (б). Рисунок (б) взят с рис. 5.18 (b).

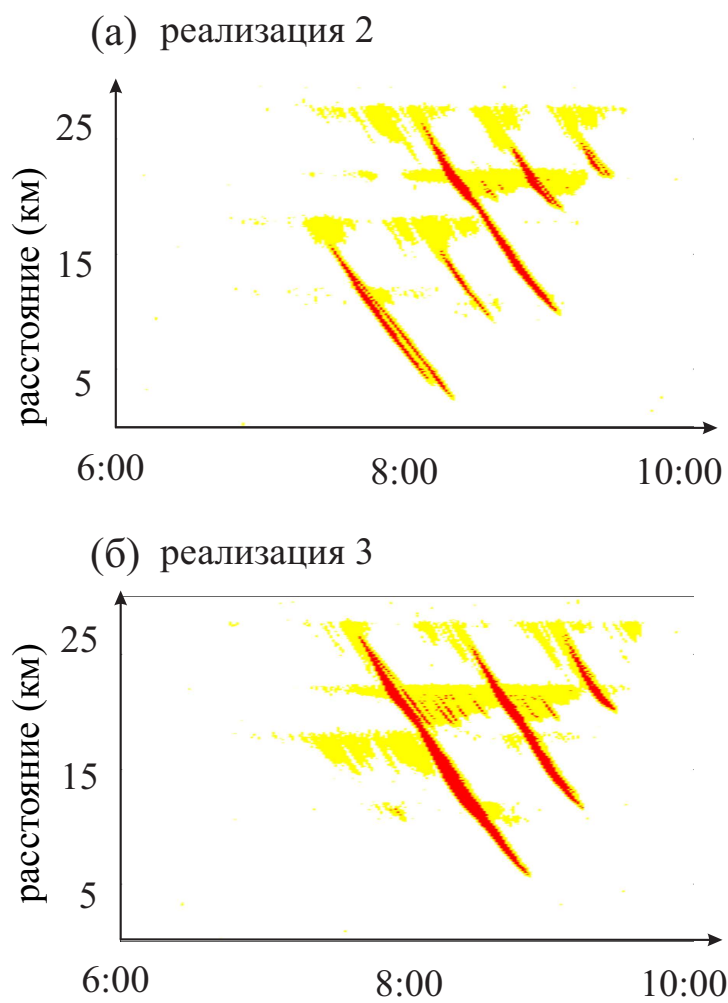


Рис. 5.21: Две другие реализации 2 и 3 при численном моделировании гетерогенного потока.

2. Широкие движущиеся кластеры не возникают спонтанно в свободном транспортном потоке. Такие кластеры возникают спонтанно только в синхронизованном потоке ($S \rightarrow J$ переход).

3. Благодаря подходящему выбору параметров в модели узких мест (въездов и съездов) стало возможным смоделировать пространственно-временную структуру плотного потока (рис. 5.20 (а)), которая очень близка как в пространстве, так и во времени, к эмпирической структуре плотного потока, реконструированной из данных дорожных детекторов с помощью использования ASDA и FOTO моделей (рис. 5.20 (б)). В соответствии с теорией трех фаз [123], такая общая структура плотного потока, распространяющаяся на несколько узких мест, называется расширенной общей структурой (EP).

4. Однако, как момент времени, в который происходит переход к плотному потоку на узком месте автодороги ($F \rightarrow S$ переход), так и пространственно-временные распределения скорости и плотности внутри возникающего синхронизованного потока, являются случайными характеристиками, которые могут быть различными в различных реализациях при численном моделировании. Эти различные реализации получаются при одних и тех же входных и выходных потоках и остальных граничных условиях за счет различных начальных значений для случайных флуктуаций модели, задаваемых функцией $rand()$. Было получено, что в реализациях 1, 2, и 3, показанных на рис. 5.20 (а) и рис. 5.21 (а), (б), моменты времени, в который происходит переход к плотному потоку на узких местах автодороги, действительно отличаются друг от друга.

5. Момент времени, в который происходит возникновение широкого движущегося кластера в синхронизованном потоке тоже является случайной величиной, которая может быть различна в различных реализациях. Более того, в отличие от перехода к плотному потоку, который в различных реализациях происходит поблизости от узкого места, возникновение и исчезновение широкого движущегося кластера может происходить в случайных местах на автодороге. Существует значительное различие как для момента возникновения, так и для положения $S \rightarrow J$ перехода в различных численных реализациях. В частности, некоторые из широких движущих-

ся кластеров, которые появляются в одних реализациях, не возникают в других (см. реализация 1 на рис. 5.20 (а) в сравнении с реализациями 2 и 3 на рис. 5.21). Кроме того, исчезновение широкого движущегося кластера также является случайной характеристикой общей структуры плотного потока и различается в разных численных реализациях.

5.4. Вычислительный эксперимент по оценке качества и точности предупреждения водителей о пробках

Хотя сервис “предупреждение о пробке” уже существует на рынке, вопрос о качестве пространственно-временной реконструкции фронтов широких движущихся кластеров (своевременное предупреждение и пространственно корректный прогноз) остается по-прежнему важным. Важнейшей характеристикой сервиса “предупреждение о пробке” является точность прогноза положения фронтов широких движущихся кластеров как функции времени и координаты. В этом параграфе, базируясь на [186], на основе модели Главы 3 и ее дальнейшего развития для гетерогенного транспортного потока, сделанного в § 5.3, проводится вычислительный эксперимент по численному моделированию точности прогноза положения фронтов широких движущихся кластеров и синхронизованного потока как функции времени и координаты путем использования так называемых пробных автомашин в транспортном потоке, т.е. автомашин, оборудованных навигационной системой и постоянно передающих свои координаты для сервиса “предупреждение о пробке”.

Для проведения этого вычислительного эксперимента разработан алгоритм для моделирования генерации предупреждения водителей о пробках, в котором используется разделение переднего фронта синхронизованного потока от переднего фронта движущегося кластера.

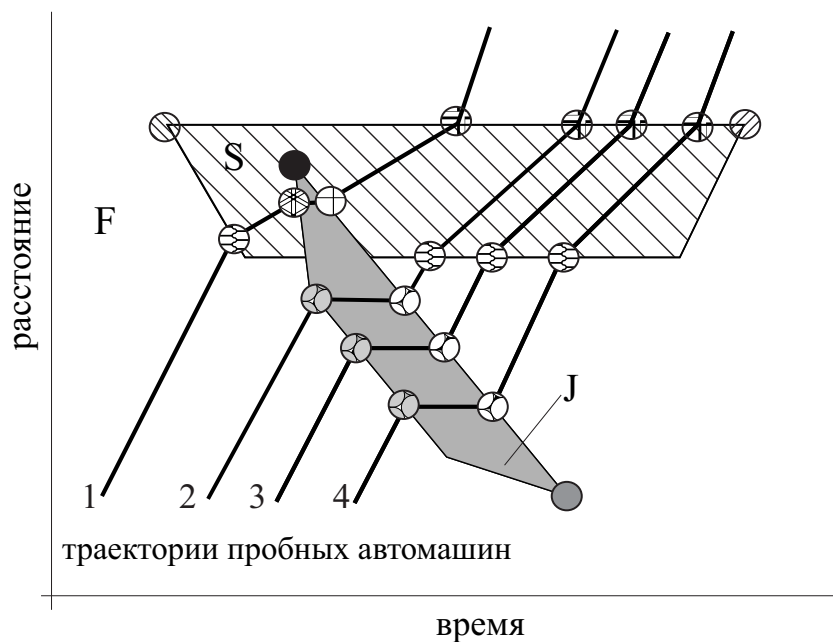
5.4.1. Реконструкция фронтов между тремя различными фазами транспортного потока с помощью пробных машин

Сначала нужно определить термин *точка перехода* внутри фронта между различными фазами транспортного потока вдоль траектории пробной автомашины. Такая точка определяет положение на дороге и момент времени, когда пробная автомашина переходит из одной фазы в другую, и относится к фронту, которых разделяет эти две фазы. В частности, можно выделить следующие типы точек перехода между различными фазами транспортного потока вдоль траектории пробной автомашины (рис. 5.22):

- (а) точка перехода между свободным потоком и синхронизованным потоком (точка F_S),
- (б) точка перехода между синхронизованным потоком и свободным потоком (точка S_F),
- (в) точка перехода между свободным потоком и широким движущимся кластером (точка F_J),
- (г) точка перехода между синхронизованным потоком и широким движущимся кластером (точка S_J),
- (д) точка перехода между широким движущимся кластером и свободным потоком (точка J_F),
- (е) точка перехода между широким движущимся кластером и синхронизованным потоком (точка J_S).

Для вычисления точек перехода использовалась модель распознавания точек перехода, разработанная и представленная в [186]. В этой модели для приближенного определения положения точки перехода от одной фазы транспортного потока к другой при движении пробной автомашины в транспортном потоке используется условие, что скорость автомашины вдоль траектории остается выше (или ниже) заданного значения скорости в течении промежутка времени, большего, чем заданный временной интервал для данного типа точки перехода.

Данная модель распознавания точек перехода была применена для эмпирических данных пробных машин, измеренных приборами фирмы



F – свободный поток S – синхронизованный поток
 J – широкий движущийся кластер

- | | | | |
|---|---------------|---|-------------------------------|
| ⊗ | F → S переход | ⊕ | J _S точка перехода |
| ● | S → J переход | ⊕ | S _F точка перехода |
| ● | J → F переход | ⊗ | F _S точка перехода |
| ⊗ | S → F переход | ⊗ | S _J точка перехода |
| | | ⊗ | F _J точка перехода |
| | | ⊗ | J _F точка перехода |

Рис. 5.22: Качественное объяснение отличия точек перехода между фазами транспортного потока вдоль траекторий пробных автомашин от собственно фазовых переходов в транспортном потоке. Незакрашенная область - свободный поток (F), заштрихованная область - синхронизованный поток (S), серая область - широкий движущийся кластер (J).

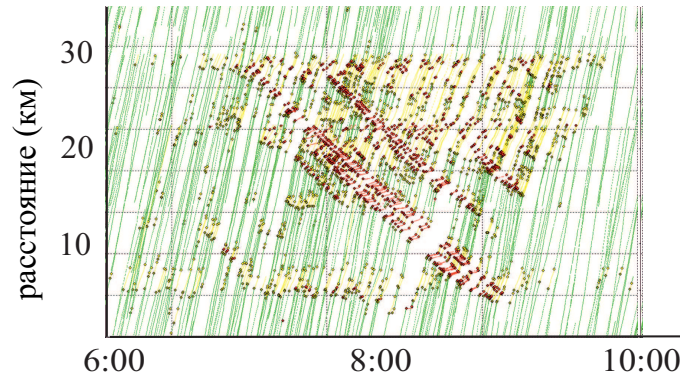


Рис. 5.23: Применение модели [186] для идентификации точек перехода между различными фазами транспортного потока вдоль траекторий пробных автомашин, показанных на рис. 5.18 (а).

TomTom (рис. 5.18 (а)). Сначала находится скорость вдоль траектории пробной автомашины с помощью линейной аппроксимации для измерений скорости и координаты автомашины, сделанных с временным шагом $\Delta t = 10$ с, который задавался точностью измерений приборов фирмы TomTom. Затем модель [186] применялась для каждой траектории пробной автомашины, чтобы найти точки перехода между различными фазами транспортного потока вдоль траекторий. Результат показан на рис. 5.23, где каждая точка относится к положению на автодороге, когда пробная автомашина проходит фронт, разделяющий две различные фазы транспортного потока. Соответственно, точки перехода определяют границы в пространстве и времени, между которыми существует фаза транспортного потока, как показано на рис. 5.23.

5.4.2. Численное моделирование пространственно-временной динамики для различного уровня проникновения данных пробных автомашин в транспортном потоке

Численное моделирование позволяет найти зависимость распознавания точек перехода между различными фазами транспортного потока от уровня проникновения данных пробных автомашин (penetration rate of probe

vehicle data), случайным образом распределенных в транспортном потоке. В самом деле, после того, как пространственно-временная структура плотного потока была найдена в рамках микроскопического численного моделирования (рис. 5.20 (а)), имеется информация о траекториях всех автомобилей, проходящих через эту структуру. Можно рассматривать некоторые из этих автомобилей в качестве пробных автомобилей, траектории которых доступны благодаря V2X-коммуникации (коммуникация между автомобилями или между автомобилем и инфраструктурой). При этом процент пробных автомобилей в транспортном потоке обозначался как η , а сами пробные автомобили были распределены случайным образом среди всех остальных автомобилей. Траектории таких пробных автомобилей при разных процентах $\eta = 2\%$, $\eta = 0.5\%$, и $\eta = 0.25\%$ представлены на рис. 5.24 (слева).

Результаты идентификации точек перехода между различными фазами транспортного потока вдоль траекторий пробных автомобилей (рис. 5.24, (слева)) для различного процента пробных автомобилей $\eta = 2\%$, $\eta = 0.5\%$, и $\eta = 0.25\%$ показаны соответственно на рис. 5.24 (справа). Можно видеть, что пробные автомобили реконструируют вид и многие важные свойства пространственно-временной структуры плотного потока уже при уровне проникновения пробных автомобилей около $\eta = 0.5\%$.

5.4.3. Генерация сообщений “предупреждение о пробке”

5.4.3.1. Генерация сообщений “предупреждение о пробке” на основе эмпирических данных от пробных автомобилей

Идентификация фаз транспортного потока и точек перехода между ними вдоль траекторий пробных автомобилей позволяет генерировать сообщение “предупреждение о пробке” следующим образом: данное сообщение о пробке генерируется пробной автомобилем, когда либо точка F_J (точка перехода от свободного потока к широкому движущемуся кластеру), либо точка S_J (точка перехода от синхронизованного потока к широкому движущемуся кластеру) идентифицируется во время движения автомобиля.

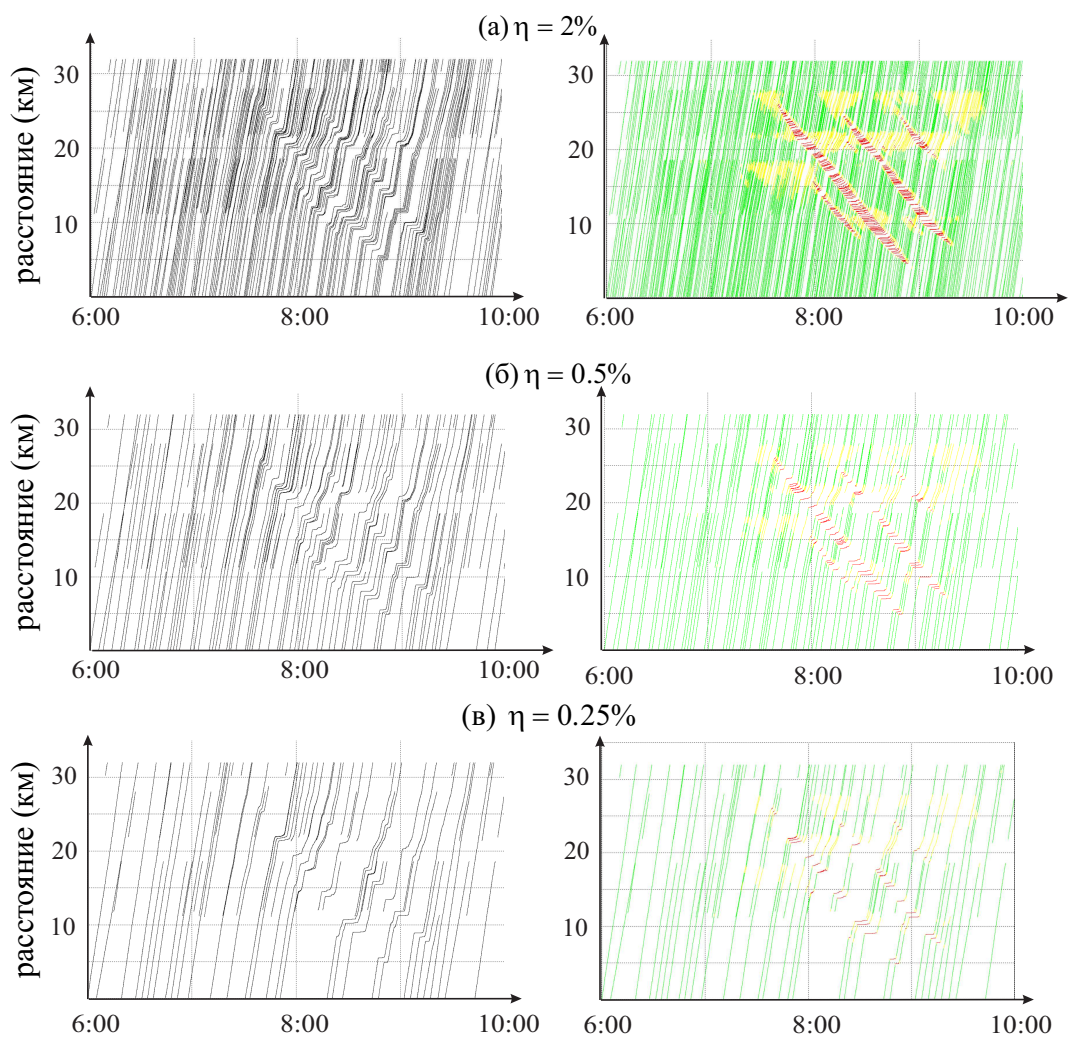


Рис. 5.24: Траектории пробных автомашин (рисунок слева) в общей структуре плотного потока, показанной на рис. 5.20 (а), и результаты идентификации точек перехода между различными фазами транспортного потока (рисунок справа) для различного процента пробных автомашин: $\eta = 2\%$ (а), $\eta = 0.5\%$ (б), и $\eta = 0.25\%$ (в).

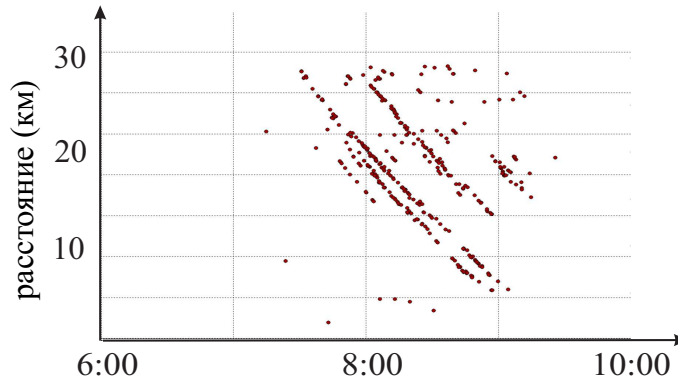


Рис. 5.25: Реконструкция движения переднего по потоку фронта широких движущихся кластеров на основе идентификации фаз транспортного потока в эмпирических данных о траекториях пробных автомашин, показанных на рис. 5.23.

Затем последовательность этих сообщений, генерируемых всеми пробными автомашинами (рис. 5.25) позволяет распознать распространение переднего по потоку фронта широкого движущегося кластера по автодороге. Это распространение переднего по потоку фронта широкого движущегося кластера может быть использовано для предупреждения всех остальных автомашин, приближающихся к этому фронту.

Поскольку одновременно имелись как TomTom GPS данные пробных автомашин (рис. 5.18 (а)), так и эмпирические данные, измеренные дорожными детекторами, можно было оценить уровень проникновения пробных автомашин в транспортном потоке, измеренном 10 декабря 2009 года на рассматриваемом участке автомагистрали А5-Юг (рис. 5.17 (а)). В результате найдено, что в позиции $x = 0$ км на рис. 5.17 (а) средняя величина потока на автомагистрали в течение временного интервала от 7:00 до 10:00 была около 4000 автомашин/ч. Среднее число TomTom GPS данных пробных автомашин в течение того же временного интервала в данной позиции составляло 41. Таким образом, средний уровень проникновения TomTom данных пробных автомашин (рис. 5.18 (а)) в транспортном потоке составлял около 1%.

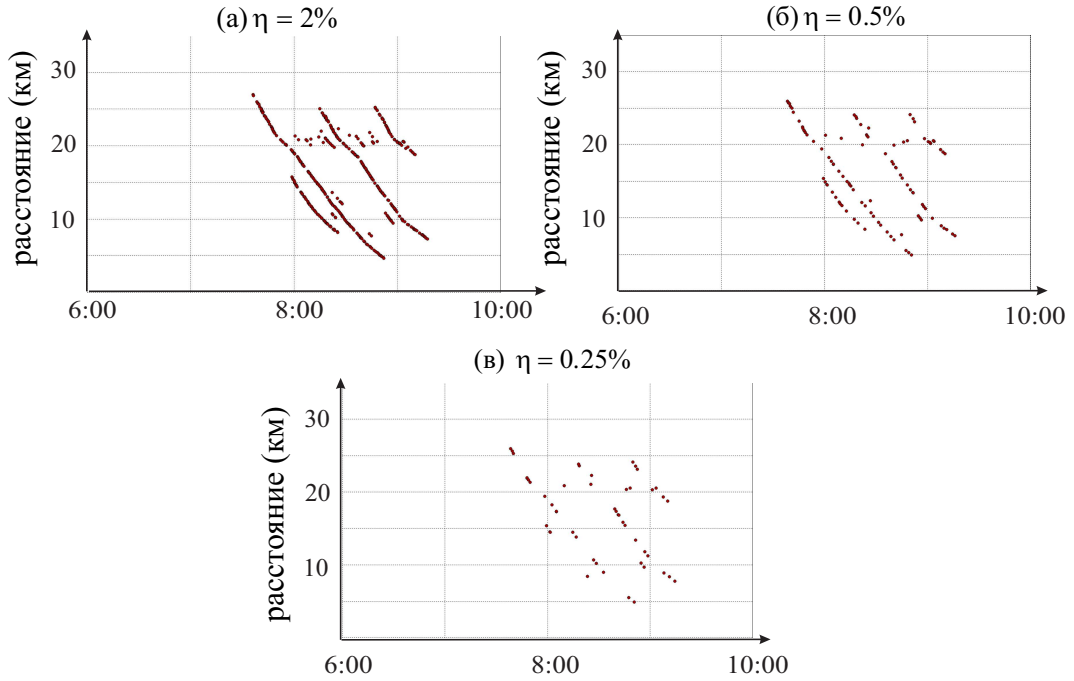


Рис. 5.26: Распознавание переднего по потоку фронта широкого движущегося кластера (сообщение “предупреждение о пробке”) для различного процента пробных автомашин: $\eta = 2\%$ (а), $\eta = 0.5\%$ (б), и $\eta = 0.25\%$ (в).

5.4.3.2. Зависимость сообщений с предупреждением о пробке от уровня проникновения данных пробных автомашин

Как показано выше, эмпирические данные пробных автомашин, которые доступны для исследования, относятся к среднему уровню проникновения около 1%. Путем использования модельных траекторий пробных автомашин, случайным образом распределенных в транспортном потоке (рис. 5.24), можно найти зависимость сообщений с предупреждением о пробке от уровня проникновения данных пробных автомашин.

В случае, когда скорость внутри синхронизованного потока достаточно мала (пороговое значение для скорости синхронизованного потока может быть параметром, заданным в пробной автомашине), то предупреждающее сообщение вида “впереди движение с низкой скоростью” может генерироваться пробными автомашинами, если автомашина идентифицирует точку F_S (точку перехода от свободного к синхронизованному потоку) (рис. 5.27). Распространение фронта синхронизованного потока, распознаваемое пробными автомашинами, может быть использовано для предупреждения всех

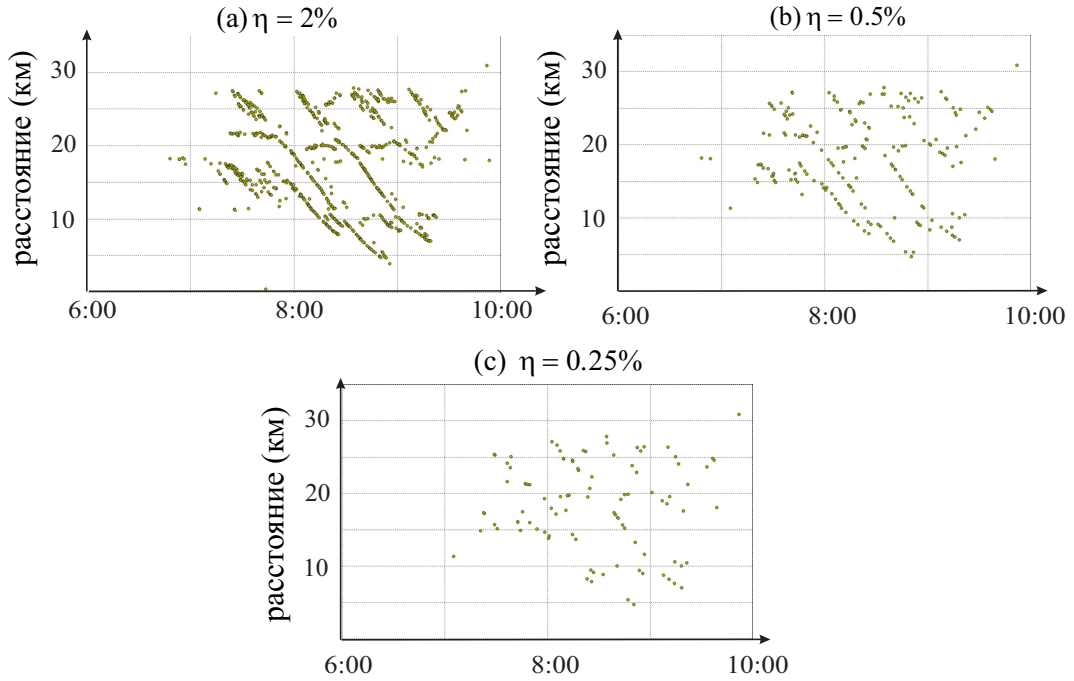


Рис. 5.27: Распознавание фронта между свободным и синхронизованным потоком (сообщение “впереди движение с низкой скоростью”) для различного процента пробных автомашин: $\eta = 2\%$ (а), $\eta = 0.5\%$ (б) и $\eta = 0.25\%$ (в).

остальных автомашин, приближающихся к этому фронту синхронизованного потока.

Модель идентификации фаз транспортного потока позволяет также генерировать сообщения, показывающие возможность для ускорения автомашины из широкого движущегося кластера либо до синхронизованного потока (точка J_S), либо до свободного потока (точка J_F) (рис. 5.28). Обнаружение с помощью пробных автомашин распространения заднего по потоку фронта широкого движущегося кластера, где автомашины ускоряются и выезжают из этого кластера, может помочь другим автомашинам внутри кластера оценить время ожидания до момента ускорения из кластера. Это может быть важным для различных ИТС, например, для гибридного управления автомашиной.

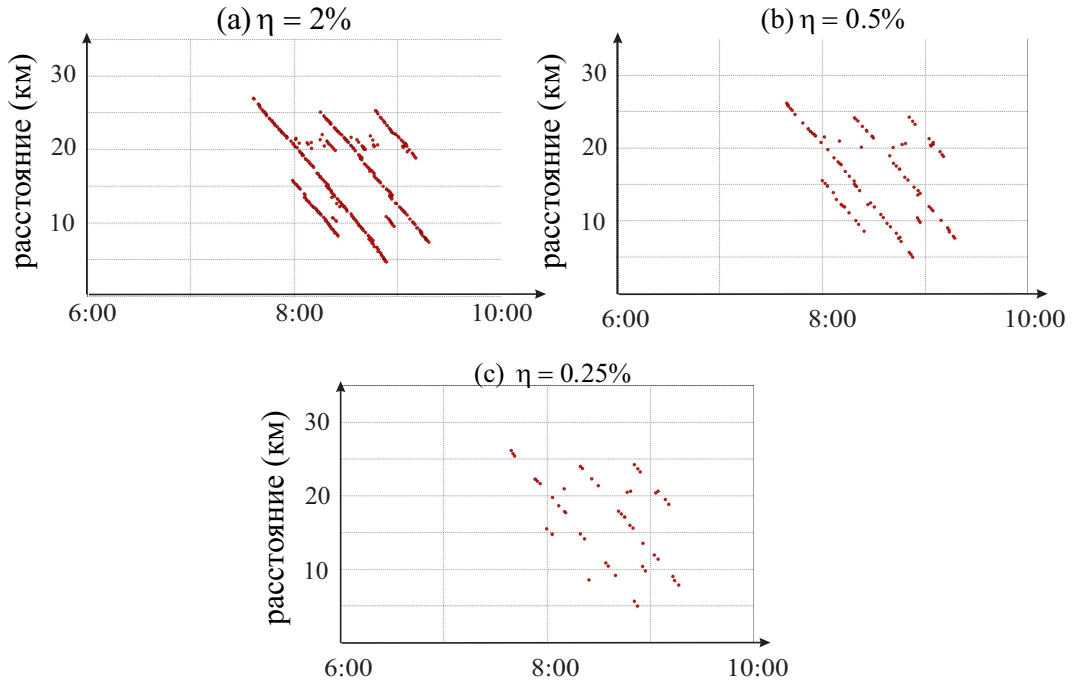


Рис. 5.28: Распознавание заднего по потоку фронта широкого движущегося кластера (сообщение “конец пробки”) для различного процента пробных автомашин: $\eta = 2\%$ (а), $\eta = 0.5\%$ (б) и $\eta = 0.25\%$ (в).

5.4.3.3. Фазы транспортного потока на разных полосах автодороги, идентифицированные с помощью данных пробных автомашин

В численном моделировании, применяя идентификацию фаз транспортного потока вдоль траекторий пробных автомашин отдельно для каждой полосы автодороги, было найдено, что позиции точки перехода между фазами могут быть существенно различными на разных полосах автодороги, и поэтому при одной и той же координате на автодороге на разных полосах могут быть разные фазы (рис. 5.29).

Таким образом, когда будут доступны более высокие уровни проникновения пробных автомашин, и будут применяться технологии точного определения полосы для сообщений о предупреждении об опасности, модель идентификации фаз транспортного потока вдоль траекторий автомашин может быть использована для генерации предупреждающих сообщений с точным определением полосы как для точек перехода F_J и S_J (рис. 5.30), так для точек перехода F_S и S_F (рис. 5.31), а также для точек перехода J_S

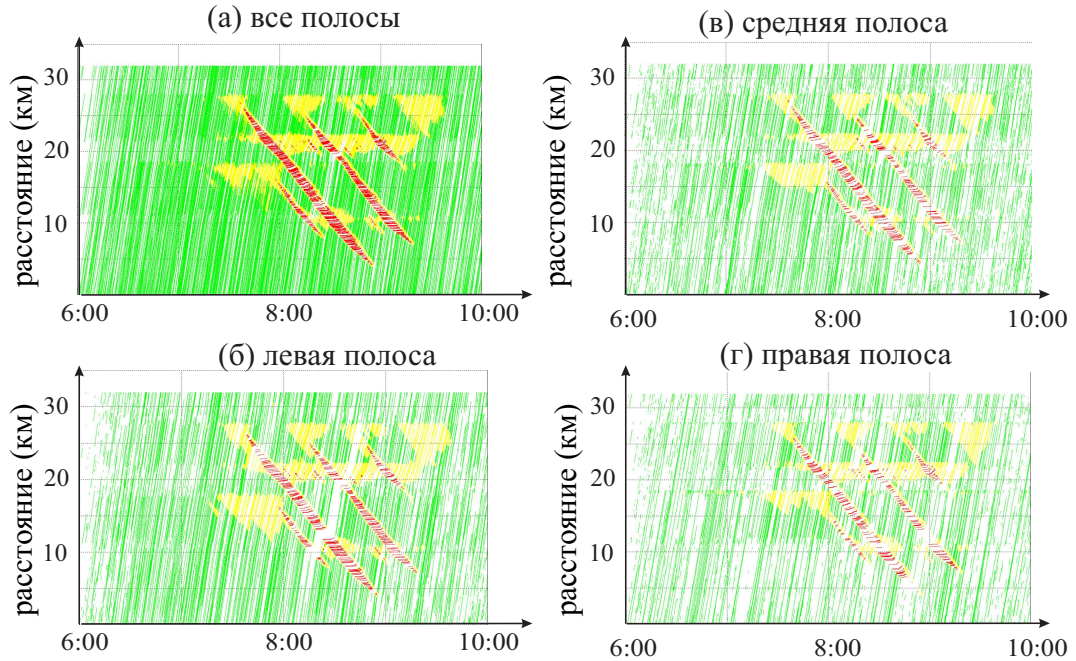


Рис. 5.29: Результат идентификации точек перехода между различными фазами транспортного потока на разных полосах автодороги для процента пробных автомашин $\eta = 5\%$: (а) – все полосы, (б) – левая полоса, (в) – средняя полоса, (г) – правая полоса.

и J_F , рассмотренных выше.

На основе проведенного рассмотрения можно сделать следующие выводы.

Простая модель идентификации фаз транспортного потока вдоль траекторий автомашин, базирующаяся на теории трех фаз, позволяет осуществлять надежную генерацию сообщений об опасности, таких как предупреждение о пробке, а также реконструировать вид и многие важные свойства пространственно-временных структур плотного потока уже при уровне проникновения в 0.5% пробных автомашин, случайно распределенных в транспортном потоке.

Когда уровень проникновения пробных автомашин достигает около в 2% от всех автомашин, возможно осуществить реконструкцию высокого качества почти для всей пространственно-временной динамики синхронизованного потока и широких движущихся кластеров.

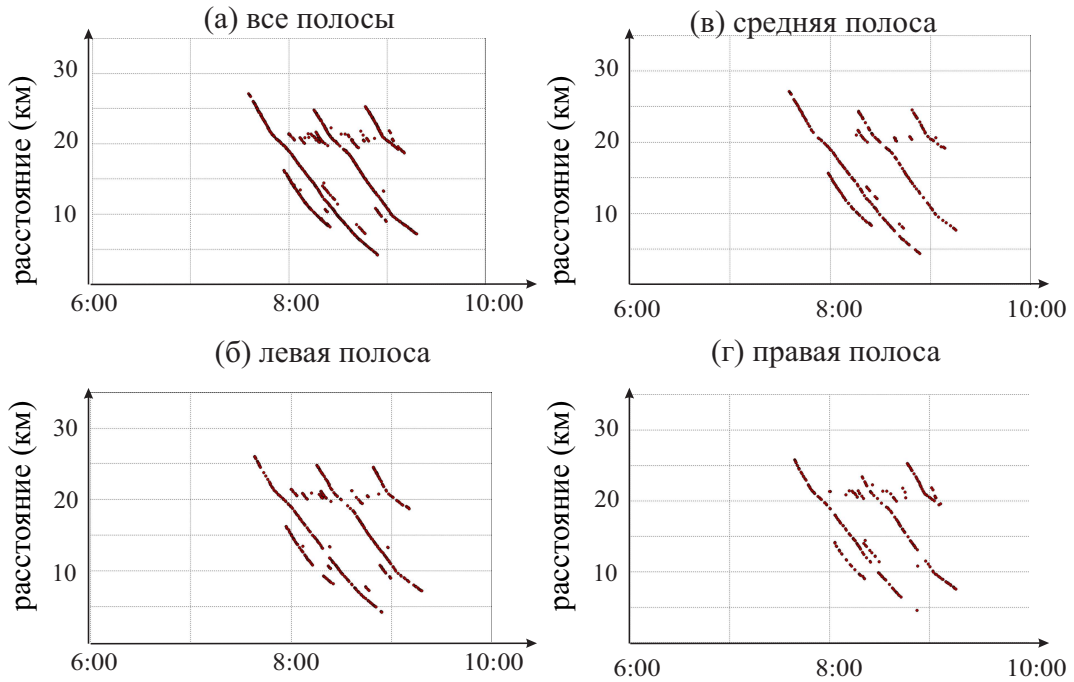


Рис. 5.30: Распознавание переднего по потоку фронта широкого движущегося кластера (сообщение “предупреждение о пробке”) на разных полосах автодороги для процента пробных автомашин $\eta = 5\%$: (а) – все полосы, (б) – левая полоса, (в) – средняя полоса, (г) – правая полоса.

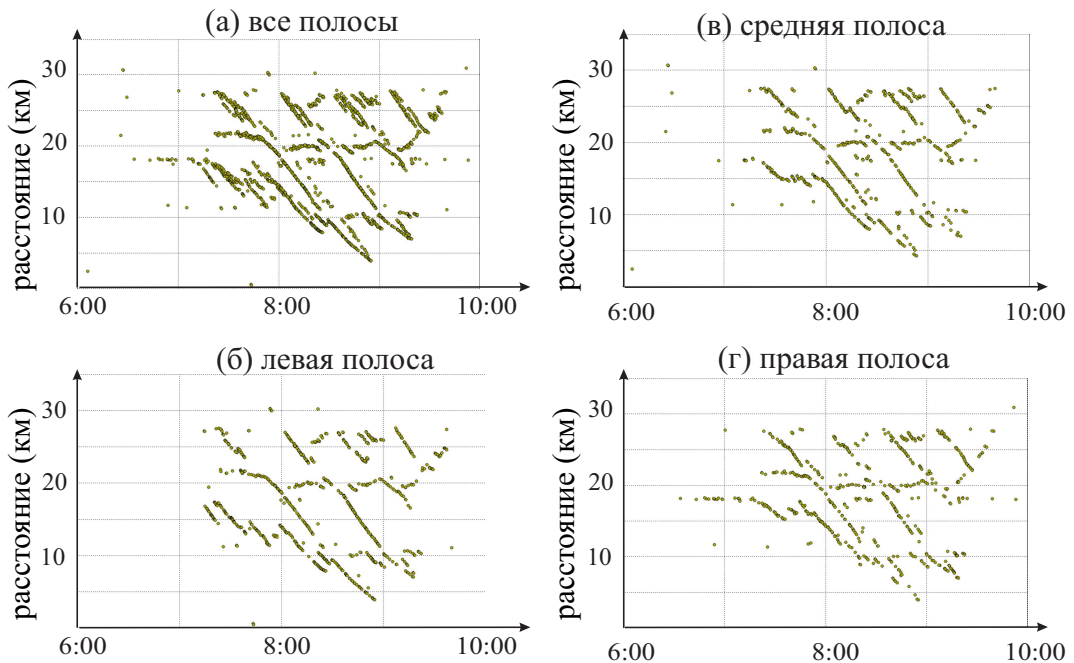


Рис. 5.31: Распознавание точки перехода F_S на разных полосах автодороги для процента пробных автомашин $\eta = 5\%$: (а) – все полосы, (б) – левая полоса, (в) – средняя полоса, (г) – правая полоса.

5.5. Вычислительный эксперимент по моделированию перенасыщенного режима транспортного потока на светофоре

5.5.1. Модель городского транспортного потока

5.5.1.1. Адаптация параметров модели городского транспортного потока

Эмпирические параметры пространственно-временных структур транспортного потока в городе (см., например, обзор [77]) были использованы для адаптации параметров модели транспортного потока для городских условий. В частности, в модель городского транспортного потока должно быть добавлено условие большего ускорения для автомашин, ускоряющихся из очереди перед светофором при включении зеленого сигнала. Это большее ускорение требуется, чтобы соответствовать эмпирической величине так называемого потерянного времени (lost time) в течении зеленой фазы светофора $\delta t = T_G - T_G^{(\text{eff})} \approx 3\text{--}4$ с [65, 77]. Сделаны следующие добавление в модели: когда разница скоростей $\Delta v_n = v_{\ell,n} - v_n$ достаточно велика и/или достаточно большое ускорение автомашины впереди $A_{\ell,n}$ на шаге n , так что выполняется условие

$$\Delta v_n + A_{\ell,n} \tau \geq \Delta v_a, \quad (5.36)$$

то используется более высокое максимальное ускорение $a_{\text{max}} = k_a a$ для автомашин по сравнению с моделью транспортного потока на скоростных автодорогах. В (5.36), модельный параметр $k_a > 1$; k_a , Δv_a – постоянные. В противном случае, когда условие (5.36) не выполняется, максимальное ускорение сохраняется равным a , как в исходной модели для транспортного потока на скоростных автодорогах (§ 3.2). В результате, в численной модели городского транспортного потока потерянное время $\delta t = T_G - T_G^{(\text{eff})} \approx$ составило 3.2 с, что соответствует эмпирическим значениям [65, 77].

5.5.2. Правила движения автомашин в модели городского транспортного потока

Для модели городского транспортного потока разработан алгоритм для моделирования прохождения машинами светофора, который делает прогноз возможности проехать светофор до начала красной фазы и одновременно обеспечивает плавную динамику подъезда к светофору в течении красной фазы.

В модели городского транспортного потока, скорость v_{n+1} , координата x_{n+1} , и ускорение A_{n+1} автомашины на временном шаге $n+1$ находятся из уравнений:

$$v_{n+1} = \max(0, \min(v_{\text{free}}, \tilde{v}_{n+1} + \xi_n, v_n + a_{\text{max}}\tau, v_{s,n})), \quad (5.37)$$

$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1}\tau, \quad (5.38)$$

$$A_{n+1} = (v_{n+1} - v_n)/\tau, \quad (5.39)$$

$$\tilde{v}_{n+1} = \min(v_{\text{free}}, v_{s,n}, v_{c,n}), \quad (5.40)$$

$$v_{c,n} = \begin{cases} v_{c,n}^{(1)} & \text{если } \Delta v_n + A_{\ell,n}\tau < \Delta v_a \\ v_{c,n}^{(2)} & \text{если } \Delta v_n + A_{\ell,n}\tau \geq \Delta v_a, \end{cases} \quad (5.41)$$

$$v_{c,n}^{(1)} = \begin{cases} v_n + \Delta_n^{(1)} & \text{если } g_n \leq G_n \\ v_n + a_n\tau & \text{если } g_n > G_n, \end{cases} \quad (5.42)$$

$$\Delta_n^{(1)} = \max(-b_n\tau, \min(a_n\tau, v_{\ell,n} - v_n)), \quad (5.43)$$

$$v_{c,n}^{(2)} = v_n + \Delta_n^{(2)}, \quad (5.44)$$

$$\Delta_n^{(2)} = k_a a_n \tau \max(0, \min(1, \gamma(g_n - v_n\tau))), \quad (5.45)$$

$$a_{\text{max}} = \begin{cases} a & \text{если } \Delta v_n + A_{\ell,n}\tau < \Delta v_a \\ k_a a & \text{если } \Delta v_n + A_{\ell,n}\tau \geq \Delta v_a, \end{cases} \quad (5.46)$$

Таблица 5.6: Параметры для правил движения автомашин, часто используемые для численного моделирования городского потока

$$\begin{aligned}
 \tau_{\text{safe}} = \tau = 1 \text{ с}, \quad d = 7.5\text{м}/\delta x, \\
 \delta x = 0.01\text{м}, \quad \delta v = 0.01\text{мс}^{-1}, \quad \delta a = 0.01\text{мс}^{-2}, \\
 v_{\text{free}} = 15.278\text{мс}^{-1}/\delta v \text{ (55км/ч)}, \quad b = 1\text{мс}^{-2}/\delta a, \quad a = 0.5\text{мс}^{-2}/\delta a, \\
 \Delta v_a = 2\text{мс}^{-1}/\delta v, \quad k_a = 4, \quad \gamma = 1, \\
 k = 3, \quad p_1 = 0.35, \quad p_b = 0.1, \quad p_a = 0.03, \quad p^{(0)} = 0.005, \\
 p_0(v_n) = 0.667 + 0.083 \min(1, v_n/v_{01}), \\
 p_2(v_n) = 0.48 + 0.32\Theta(v_n - v_{21}), \\
 v_{01} = 6\text{мс}^{-1}/\delta v, \quad v_{21} = 7\text{мс}^{-1}/\delta v, \\
 a^{(0)} = 0.2a, \quad a^{(a)} = a, \\
 a^{(b)}(v_n) = 0.2a + 0.8a \max(0, \min(1, (v_{22} - v_n)/\Delta v_{22})), \\
 v_{22} = 7\text{мс}^{-1}/\delta v, \quad \Delta v_{22} = 2\text{мс}^{-1}/\delta v, \\
 \delta_1 = 2\text{мс}^{-1}/\delta v, \quad L_a = 80\text{м}/\delta x, \quad p_c = 0.1.
 \end{aligned}$$

где γ – постоянная (см. таблицу 5.6).

В (5.37)–(5.46), функции и переменные $a_n, b_n, \xi_n, G_n, v_{s,n}$ задаются соответствующими формулами §§ 3.2.1–3.2.4. Использовались те же самые правила для смены полосы и моделей въездом/съездов, которые представлены в § 3.3, § 3.4 для модели транспортного потока на скоростных автодорогах.

Для моделирования гетерогенного городского транспортного потока модель (5.37)–(5.46) для одинаковых автомашин расширялась аналогично тому, как это было сделано в § 5.3 и § 5.3.4 для модели гетерогенного потока на скоростных автодорогах.

5.5.3. Синхронизованный поток в перенасыщенном режиме транспортного потока на светофоре

Существует два основных режима городского транспортного потока на светофоре: ненасыщенный режим и перенасыщенный режим.

В ненасыщенном режиме транспортного потока на светофоре все автомашины, которые ожидают в очереди в течении красной фазы светофора,

могут проехать светофор в течении зеленой фазы. Противоположная ситуация происходит в перенасыщенном режиме: некоторые из автомашин в очереди не успевают проехать светофор за время зеленой фазы, что в свою очередь вызывает рост очереди перед светофором (рис. 5.32 (а, б)) [65, 77, 324]. В соответствии с классической теорией [65, 77, 324], хорошо развитый перенасыщенный транспортный поток состоит из последовательности бегущих очередей, внутри которых автомашины неподвижны, и разделяющих эти очереди промежутков, в которых автомашины двигаются из одной бегущей очереди в соседнюю ниже по течению. При этом средняя длительность остановки автомашины внутри бегущей очереди обычно не меняется, пока бегущая очередь перемещается против потока, удаляясь от светофора (рис. 5.32 (в)).

В результате численного моделирования установлено, что, дополнительно к бегущим очередям в классической теории, в перенасыщенном режиме на светофоре может возникать синхронизованный поток. Это происходит, когда эффект адаптации скорости автомашины к скорости автомашины впереди (§ 1.6.4) достаточно сильный, что приводит к увеличению дистанции между автомашинами в области перед бегущей очередью и вызывает рассасывание этой очереди. В модели § 5.5.2, использованной во всех численных экспериментах, эффект адаптации скорости происходит в 2D-области состояний синхронизованного потока, когда дистанция до автомашины впереди удовлетворяет условию $g_{\text{safe}} \leq g \leq G$, где g_{safe} - минимальное безопасное расстояние, G - расстояние синхронизации (рис. 5.33 (б)). Чем сильнее эффект адаптации, тем больше средняя дистанция (и больше временной интервал) между автомашинами в синхронизованном потоке.

Параметрами при моделировании эффекта адаптации скорости являются вероятности p_2 и p_1 в § 3.2.3. Вводя дополнительный коэффициент адаптации скорости ε , можно изменять эти вероятности следующим образом:

$$p_1 = \min(1, (1 + \varepsilon)p_1^{(0)}), \quad p_2 = \min(1, (1 + \varepsilon)p_2^{(0)}(v_n)), \quad (5.47)$$

где $p_1^{(0)} = 0.3$, $p_2^{(0)}(v_n) = 0.48 + 0.32\Theta(v_n - v_{21})$. Чем больше ε , тем сильнее

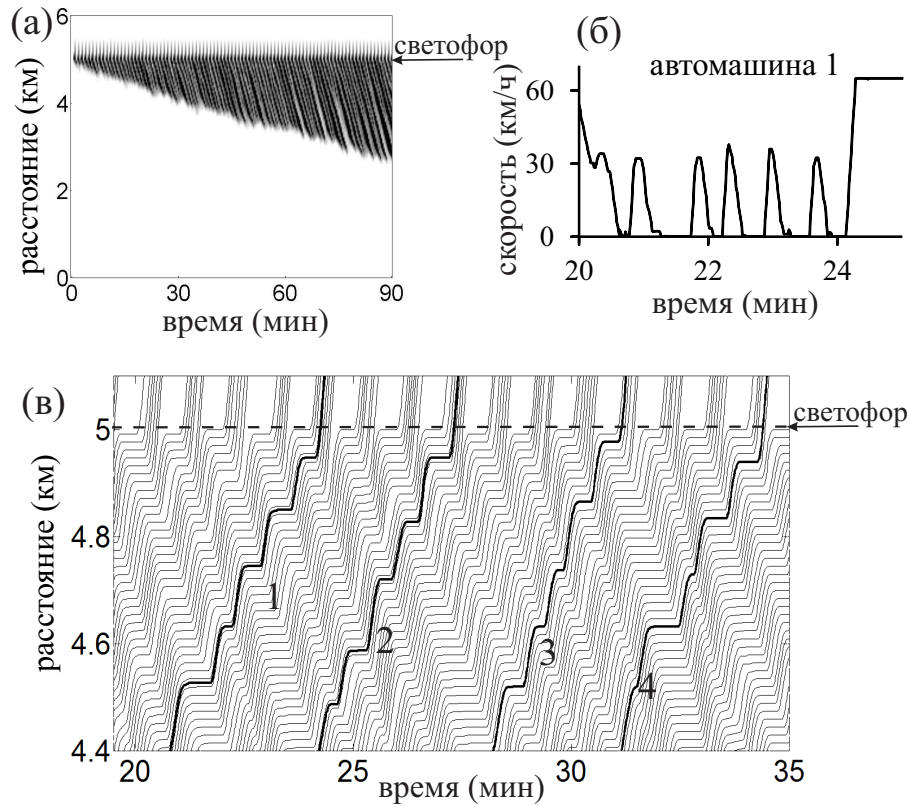


Рис. 5.32: Пространственно-временная структура перенасыщенного потока на светофоре в классической теории транспортного потока на светофоре [65, 77, 324], рассчитанная с помощью численной модели § 5.5.2: (а) – скорость как функция координаты и времени, показанная серым цветом переменной степени (степень серого цвета меняется от черного до белого, когда скорость меняется от 0 км/ч (черный) до 50 км/ч (белый)); (б) – скорость отдельных автомашин вдоль их траекторий, показанных на (в); (в) – траектории автомашин (для каждой 2-й автомашины) в течение заданного временного интервала на участке однополосной автодороги длиной 600 м перед светофором, расположенном в позиции с координатой $x = 5$ км от начала автодороги (при $x = 0$ км). Параметры светофора: длительность цикла $\vartheta = 60$ с, время красной фазы $T_R = 28$ с, время желтой фазы $T_Y = 2$ с. Величина входного потока постоянна и равна $q_{in} = 1000$ автомашин/ч. Величина потока насыщения при разрядке очереди во время зеленой фазы светофора $q_{sat} = 1880$ автомашин/ч. Классическая пропускная способность светофора $C_{cl} = 902$ автомашин/ч. $v_{free} = 18.0558 \text{ мс}^{-1}$ (65 км/ч), остальные параметры модели представлены в таблице 5.6.

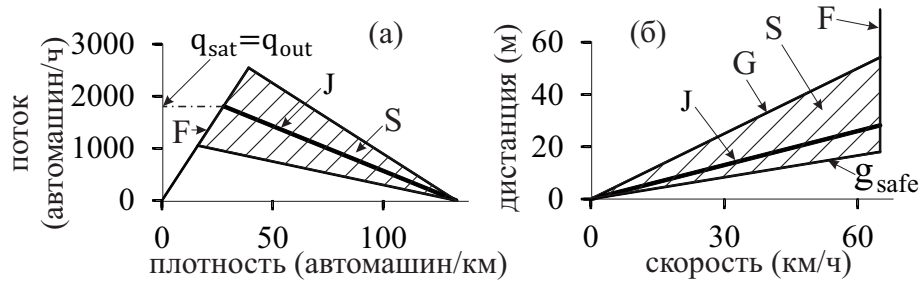


Рис. 5.33: 2D-область стационарных состояний синхронизованного потока на плоскости поток–плотность (а) и на плоскости дистанция–скорость (б) для модели городского транспортного потока § 5.5.2. F – свободный поток, S – синхронизованный поток, J – линия J.

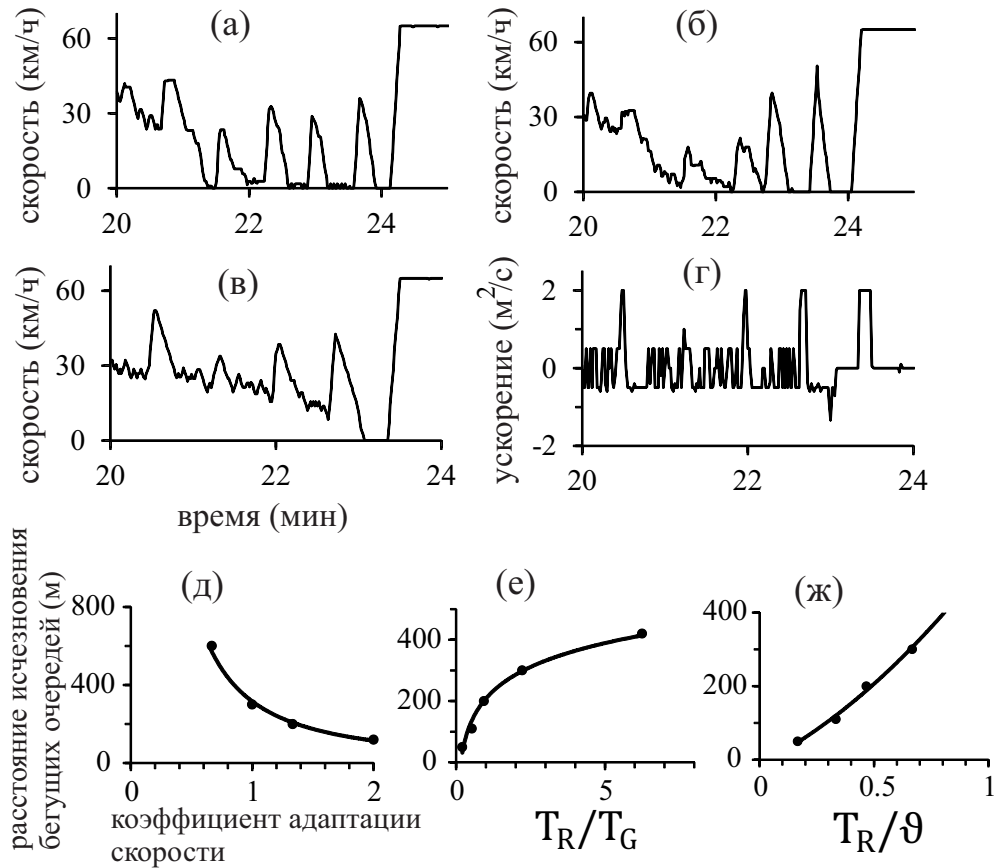


Рис. 5.34: Численное моделирование характеристик эффекта исчезновения бегущих очередей и образования вместо них синхронизованного потока: (а-г) – скорость (а-в) и ускорение (г) отдельных автомашин вдоль их траекторий при значениях параметра $\varepsilon = 0.667$ (а), 1.0 (б), 2.0 (в, г); (д-ж) – среднее расстояние между положением светофора и местом на автодороге, в котором исчезают бегущие очереди, как функция коэффициента адаптации скорости ε (д), отношения T_R/T_G (е) и отношения T_R/v (ж). На (е, ж) $\varepsilon = 1.333$. Остальные параметры такие же, как на рис. 5.32.

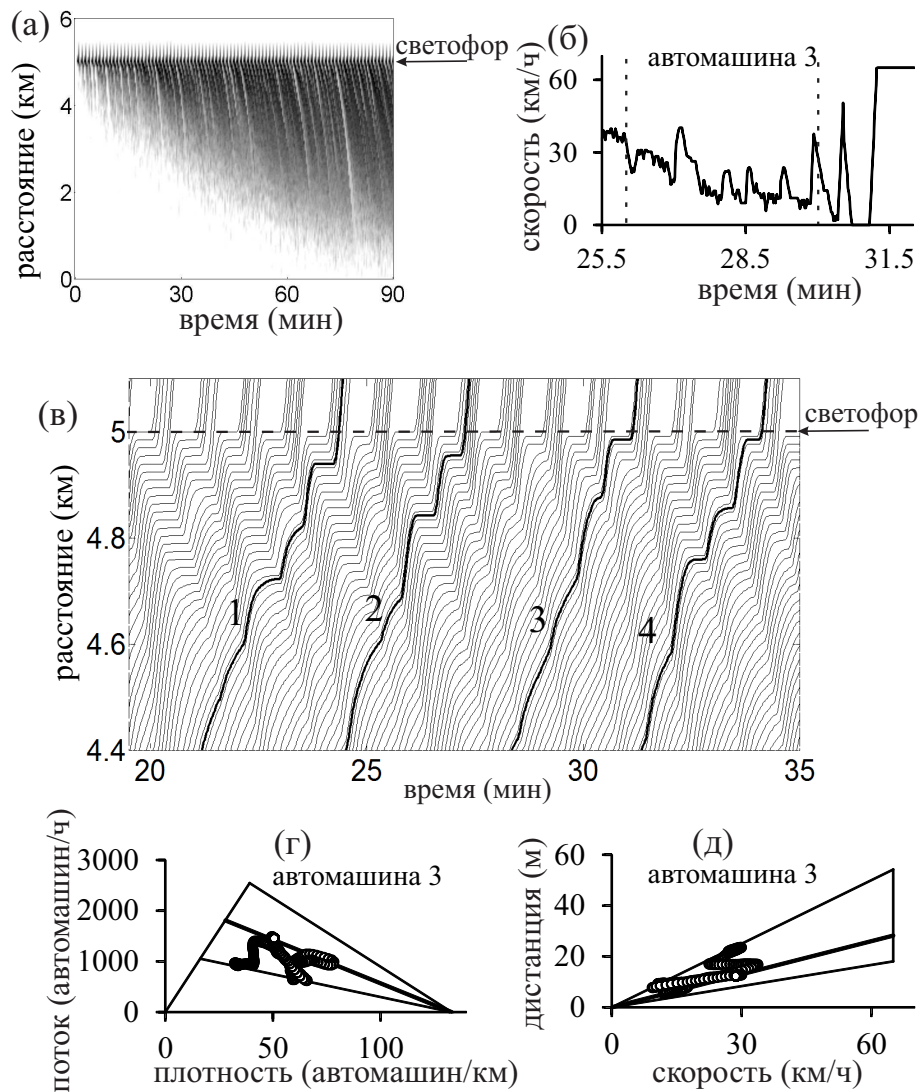


Рис. 5.35: Численное моделирование пространственно-временного эффекта рассасывания бегущих очередей с последующим образованием вместо них синхронизованного потока при значении параметра $\varepsilon = 1.333$ ($p_1 = 0.7$, $p_2 = 1$): (а, б) – скорость как функция координаты и времени, показанная серым цветом переменной степени (а), и скорость отдельной автомашины 3 (б) вдоль ее траектории, показанной на (в); (в) – фрагмент траекторий автомашин в потоке перед светофором (для каждой 2-й автомашины); (г, д) – состояния синхронизованного потока вдоль траектории 3 (данные, полученные с помощью скользящего среднего по интервалу в 20 с, в пределах временного отрезка, обозначенного вертикальными пунктирными линиями на (б)), показанные в пределах 2D-области стационарных состояний синхронизованного потока на плоскостях поток–плотность (г) и дистанция–скорость (д), взятых из рис. 5.33. Остальные параметры такие же, как на рис. 5.32.

эффект адаптации скорости внутри 2D-области состояний синхронизованного потока, и, следовательно, тем больше средняя дистанция (и больше временной интервал) между автомобилями в синхронизованном потоке.

В результате численного моделирования найдено [167], что в перенасыщенном городском транспортном потоке в случае сильной адаптации скорости увеличивается средний временной интервал между автомобилями и, как следствие, бегущие очереди рассасываются на некотором расстоянии от светофора. В результате, в перенасыщенном потоке возникают движущиеся (бегущие) структуры синхронизованного потока (MSP) (рис. 5.35). Показано, что средняя длительность остановки автомобиля внутри бегущей очереди уменьшается по мере того, как бегущая очередь перемещается против потока, удаляясь от светофора. На некотором расстоянии от светофора бегущие очереди рассасываются и перенасыщенный поток состоит только из синхронизованного потока, в котором автомобили вообще не останавливаются (рис. 5.35 (б, в)). В случае достаточно сильной адаптации скорости, автомобили останавливаются лишь один-два раза поблизости от светофора на всей своей траектории (рис. 5.35 (б, в)). Это означает, что все бегущие очереди рассасываются и трансформируются в синхронизованный поток уже на относительно небольшом расстоянии от светофора. В этом случае, в отличие от классической теории (рис. 5.32 (б, в)), автомобиль ускоряется и тормозит много раз в течении ее движения в синхронизованном потоке.

Эмпирические движущиеся структуры синхронизованного потока (MSP) в перенасыщенном городском транспортном потоке перед светофором, предсказанные в [167], были обнаружены в [111, 112, 142] (рис. 5.36 и 5.37).

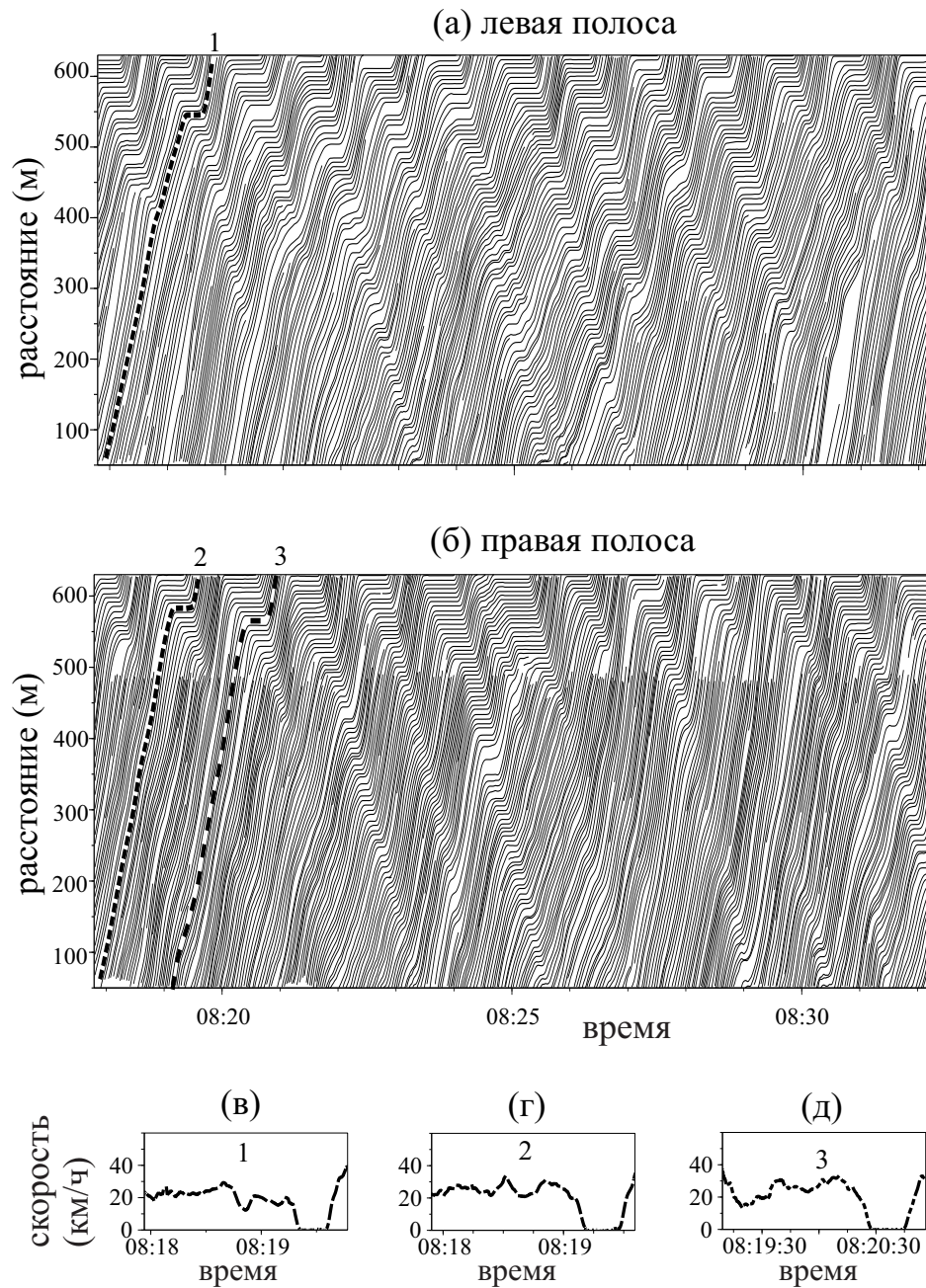


Рис. 5.36: Эмпирическое наблюдение эффекта рассасывания бегущих очередей в транспортном потоке перед светофором и формирования движущихся структур синхронизованного потока (MSP) в перенасыщенном городском транспортном потоке на некотором расстоянии от светофора [111, 112]. Данные пространственно-временных измерений, проведенных 10 декабря 2015 года: траектории всех автомашин на правой полосе (а) и на левой полосе (б), и скорость отдельных выбранных автомашин (в-д) в соответствии с номерами траекторий на (а, б). Линия остановки перед светофором соответствует координате 640 м.

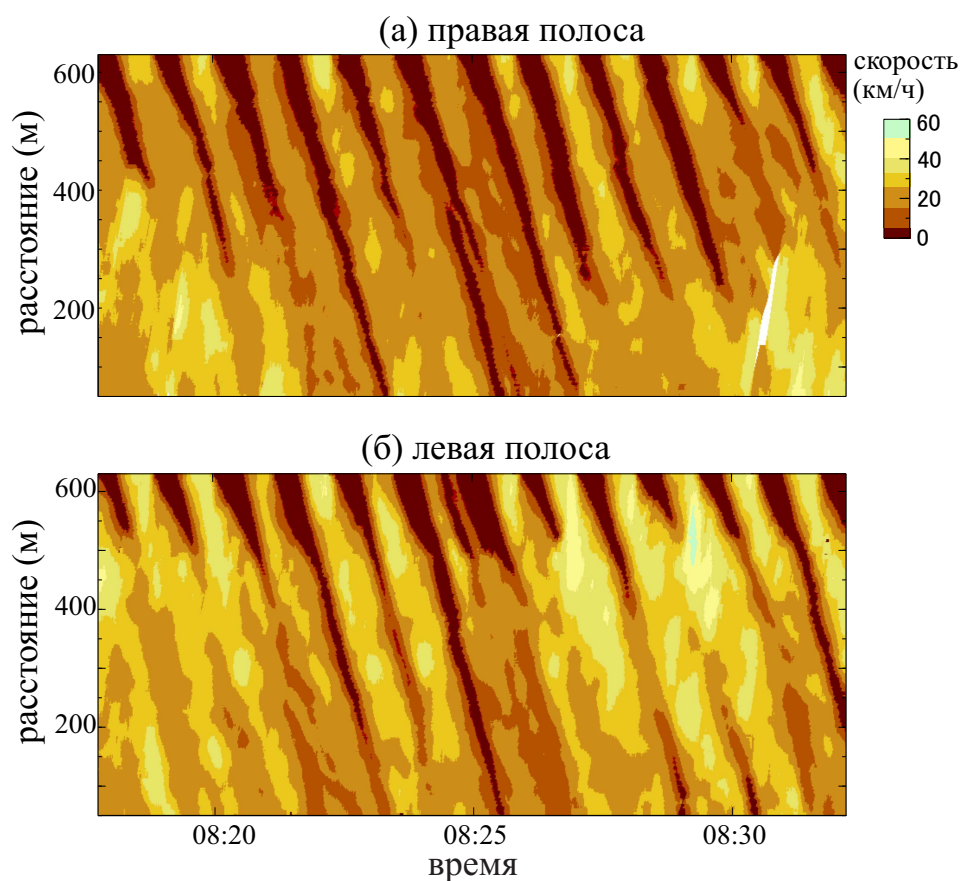


Рис. 5.37: Продолжение рис. 5.36. Эмпирическое наблюдение эффекта рассасывания бегущих очередей в транспортном потоке перед светофором и формирования движущихся структур синхронизованного потока (MSP) в перенасыщенном городском транспортном потоке на некотором расстоянии от светофора [111, 112]: Данные скорости, что и на рис. 5.36 (а, б), показанные переменным цветом.

5.6. Применения разработанных в диссертации алгоритмов и комплекса программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий на фирме Daimler в Германии

Следующие применения разработанных в диссертации алгоритмов и комплекса программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий были сделаны на фирме Daimler в Германии (рис. 5.38):

- для управления потоком машин, въезжающих на скоростную автодорогу (on-ramp metering),
- для управления скоростным режимом (speed limit control),
- для распределения трафика по транспортной сети (traffic assignment),
- для потребления топлива в транспортных сетях,
- для оценки системы адаптивного круиз-контроля (ACC).

DAIMLER

Daimler AG · 71059 Sindelfingen

Dr. Marina Kornilina
Dissertation Council D 002.024.03
Keldysh Institute of Applied Mathematics
of Russian Academy of Sciences
Miuskaya sq., 4,
125047 Moscow,
Russia

Telefon/Phone
+49 70 31 90-

Telefax/Fax
+49 70 31 90-

Hauspost-Code/
Internal Code

Ihr Zeichen, Ihre Nachricht vom/
Your reference

Unser Zeichen, unsere Nachricht vom/
Our reference

Name
E-Mail

Datum/Date

November 6th, 2017

**Reference: Dissertation of Dr. S.L. Klenov presented for the academic research degree
"Doctor of Science"**

**Subject: Certificate of results of dissertation of Dr. S.L. Klenov presented for the
academic research degree "Doctor of Science"**

Dear colleagues,

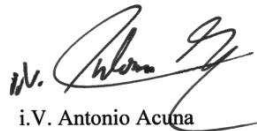
we confirm that the Kerner-Klenov stochastic microscopic three-phase model and a software code have been used by the Daimler Company in research projects for simulations of different Intelligent Transportation Systems (ITS) and the reliability of ITS. In particular, the Kerner-Klenov model have been used for analyses of the effect of automated driving vehicles on traffic flow, for simulations of on-ramp metering and speed limit control, traffic assignment in traffic networks, vehicle fuel consumption in urban areas as well as for simulations of adaptive cruise control (ACC) vehicles moving in mixed traffic flow.

We believe that results of the dissertation of Dr. S.L. Klenov presented for the academic research degree "Doctor of Science" are an important contribution for the understanding and development of reliable ITS in the future.

Kind regards,



i.V. Steffen Tacke
Manager Navigation



i.V. Antonio Acuna
Manager Functions

826/900.50.003.11.P

Daimler AG, Stuttgart, Germany
Sitz und Registergericht/Domicile and Court of Registry: Stuttgart, HRB-Nr./Commercial Register No.: 19360
Vorstand/Board of Management: Dieter Zetsche, Vorsitzender/Chairman;
Martin Daum, Renata Jungo Brünnger, Ola Källenius, Wilfried Porth,
Britta Seeger, Hubertus Troska, Bodo Uebber

Daimler AG
71059 Sindelfingen
Telefon/Phone +49 70 31 90-0
Telefax/Fax +49 7 11 17-2 22 44
dialog@daimler.com
www.daimler.com

Рис. 5.38: Свидетельство о применении разработанных в диссертации алгоритмов и комплекса программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий на фирме Daimler в Германии.

Заключение

Сформулируем основные результаты работы:

- 1) Впервые разработаны стохастические математические модели транспортных потоков, описывающие эмпирический фазовый переход от свободного к плотному транспортному потоку.
- 2) Разработан алгоритм для моделирования стохастического поведения водителей в различных ситуациях, возникающих в транспортном потоке. Алгоритм позволяет моделировать случайные ускорение и замедление машины со случайными задержками во времени.
- 3) На основе разработанных моделей найдены свойства сложных пространственно-временных структур в плотном транспортном потоке и диаграмма этих структур, которые описывают всю известную совокупность пространственно-временных структур, наблюдаемых в реальных данных измерений транспортного потока.
- 4) Разработаны алгоритмы и комплекс программ для моделирования различных интеллектуальных транспортных технологий.
- 5) На основе разработанного комплекса программ проведены вычислительные эксперименты, которые позволили установить свойства сложных ситуаций в транспортном потоке и интеллектуальных транспортных технологий: (i) коммуникации между машинами с целью предотвращения образования пробок, (ii) плотного транспортного потока, возникающего за медленно движущимися машинами, (iii) сложного гетерогенного транспортного потока, (iv) предупреждения водителей о пробках, (v) перехода к перенасыщенному режиму транспортного потока на светофоре.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность соавтору и своему учителю профессору V.S. Kerner за многолетнее сотрудничество и творческое общение, благодаря которым появилась эта работа. Автор благодарен доктору H. Rehborn, профессорам D.E. Wolf и M. Schreckenberг за участие в решении ряда задач, нашедших свое отражение в данной работе.

Список литературы

- [1] Afanasyeva L.G., Bulinskaya E.V. Stochastic Models of Transport Flows // Communications in Statistics - Theory and Methods. – 2011. – Vol. 40, № 16. – P. 2830–2846.
- [2] Afanasyeva L.G., Bulinskaya E.V. Asymptotic analysis of traffic lights performance under heavy traffic assumption // Methodology and Computing in Applied Probability. – Springer, 2013. – Vol. 15, № 4. – P. 935–950.
- [3] Алексеенко А. Е., Холодов Я. А., Холодов А. С., Горева А. И., Васильев М. О., Чехович Ю. В., Мишин В. Д., Старожилец В. М. Разработка, калибровка и верификация модели движения трафика в городских условиях. Часть I // Компьютерные исследования и моделирование. – 2015. – Т. 7, № 6. – С. 1185–1203.
- [4] Allsop R.E., Bell M.G.H., Heydecker B.G. (Eds.) Transportation and Traffic Theory – Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2007.
- [5] van Arem B., van Driel C., Visser R. The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics // IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. – 2006. – Vol. 7. – P. 429–436.
- [6] Ahn S. Cassidy M.J. Freeway traffic oscillations and vehicle lane-change maneuvers // Transportation and Traffic Theory 2007 / Eds. R.E. Allsop, M.G.H. Bell, B.G. Heydecker. – Amsterdam: Elsevier, 2007. – P. 691–710.
- [7] Алиев А.С., Стрельников А.И., Швецов В.И., Шершевский Ю.З. Моделирование транспортных потоков в крупном городе с применением

- к Московской агломерации // Автоматика и Телемеханика. – 2005. – Т. 66, № 11. – С. 113–125.
- [8] Алиев А.С., Мазурин Д.С., Швецов В.И. Модель транспортных потоков на основе 4-шаговой схемы с учетом цепочек передвижений // Труды ИСА РАН. – 2016. – Т. 66, № 1. – С. 3–9.
- [9] Алиев А.С., Мазурин Д.С., Максимова Д.А., Швецов В.И. Структура комплексной модели транспортной системы г. Москвы // Труды ИСА РАН. – 2015. – Т. 65, № 1. – С. 3–15.
- [10] Aw A., Rascle M. Resurrection of “Second Order” Models of Traffic Flow // SIAM J. Appl. Math. – 2000. – Vol. 60. – P. 916–938.
- [11] Banks J.H. Freeway speed-flow-concentration relationships: more evidence and interpretations (with discussion and closure) // Transp. Res. Rec. – 1989. – Vol. 1225. – P. 53–60.
- [12] Banks J.H. Two-capacity phenomenon at freeway bottlenecks: A basis for ramp metering? // Transp. Res. Rec. – 1990. – Vol. 1287. – P. 20–28.
- [13] Bando M., Hasebe K., Nakayama A., Shibata A., Sugiyama Y. Structure stability of congestion in traffic dynamics // Jpn. J. Appl. Math. – 1994. – Vol. 11. – P. 203–223.
- [14] Bando M., Hasebe K., Nakayama A., Shibata A., Sugiyama Y. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation // Phys. Rev. E. – 1995. – Vol. 51. – P. 1035–1042.
- [15] Bando M., Hasebe K., Nakayama A., Shibata A., Sugiyama Y. Phenomenological study of dynamical model of traffic flow // J. Phys. I. France. – 1995. – Vol. 5. – P. 1389–1399.
- [16] Barlović R., Santen L., Schadschneider A., Schreckenberg M. Metastable states in cellular automata for traffic flow // Eur. Phys. J. B. – 1998. – Vol. 5. – P. 793–800.

- [17] Bellomo N., Coscia V., Delitala M. On the Mathematical Theory of Vehicular Traffic Flow I. Fluid Dynamic and Kinetic Modelling // Math. Mod. Meth. App. Sc. – 2002. – Vol. 12. – P. 1801–1843.
- [18] Berg P., Woods A. On-ramp simulations and solitary waves of a car-following model // Phys. Rev. E. – 2001. – Vol. 64. – 035602(R).
- [19] Бланк М.Л. Точный анализ динамических систем, возникающих в моделях транспортных потоков // УМН. – 2000. – Т. 55, № 3(333). – С. 167–168.
- [20] Blank M. Variational principles in the analysis of traffic flows. (Why it is worth to go against the flow.) // Markov Processes and Related Fields. – 2000. – Vol. 6, № 3. – P. 287–304.
- [21] Blank M. Dynamics of traffic jams: order and chaos // Moscow Math. J. – 2001. – Vol. 1, № 1. – P. 1–26.
- [22] Blank M. Ergodic Properties of a Simple Deterministic Traffic Flow Model // J. Stat. Phys. – 2003. – Vol. 111. – P. 903–930.
- [23] Blank M. Hysteresis phenomenon in deterministic traffic flows // J. Stat. Phys. – 2005. – Vol. 120. – P. 627–658.
- [24] Бланк М.Л. Синхронно обновляемые процессы с запретами в моделях транспортных потоков // ТРУДЫ МФТИ. – 2010. – Т. 2, № 4. – С. 22–30.
- [25] Богданова А.И., Маненкова А.С., Смирнов Н.Н., Киселев А.Б. Исследования автотранспортных потоков и психологии водителей // Сборник ЛОМОНОСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ, серия "Механика". – М.: Изд-во МГУ. –2013.– С. 25.
- [26] Bovy P.H.L. (editor). Motorway Analysis: New Methodologies and Recent Empirical Findings. – Delft: Delft University Press, 1998.
- [27] Brilon W., Geistefeld J., Regler M. Reliability of freeway traffic flow: A stochastic concept of capacity // Transportation and Traffic Theory.

- Proceedings of the 16th Inter. Sym. on Transportation and Traffic Theory.
– Amsterdam: Elsevier, 2005. – P. 125–144/
- [28] Brilon W., Zurlinden H. Kapazität von Straßen als Zufallsgröße // Straßenverkehrstechnik. – 2004. – Heft 4. – P. 164.
- [29] Brilon W., Regler M., Geistefeld J. Zufallscharakter der Kapazität von Autobahnen und praktische Konsequenzen - Teil 1 // Straßenverkehrstechnik. – 2005. – Heft 3. – P. 136.
- [30] Brockfeld E., Kühne R.D., Skabardonis A., Wagner P. Toward benchmarking of microscopic traffic flow models // Trans. Res. Rec. – 2003. – Vol. 1852. – P. 124–129.
- [31] Brockfeld E., Kühne R.D., Wagner P. Calibration and validation of simulation models // Proceeding of the Transportation Research Board 84th Annual Meeting. Washington, DC: TRB, 2005. – Paper No. 05-2152.
- [32] Бугаев А.С., Буслаев А.П., Лубашевский И.А., Приходько В.М. Автотранспортные потоки как объект научных исследований. – М.: Российская академия наук, Институт общей физики (ИОФАН), Препринт 43. – 2006. – 63 с.
- [33] Бугаев А.С., Буслаев А.П., Яшина М.В. Дорожное движение в мегаполисах: проблемы и перспективы решения. Часть 1. Общие вопросы. – М.: Технополиграфцентр, 2009. – 184 с.
- [34] Бугаев А.С., Буслаев А.П., Козлов В.В., Яшина М.В. Некоторые математические и информационные аспекты моделирования трафика // Т-Comm -Телекоммуникации и транспорт. – 2011. – № 4. – С. 29–31.
- [35] Blinkin M. Y., Koncheva E. Transport Systems of Russian Cities. Ongoing Transformations. – Berlin: Springer, 2016. – 299 p.
- [36] Bugaev A.S., Buslaev A.P., Kozlov V.V., Yashina M.V. Distributed Problems of Monitoring and Modern Approaches to Traffic Modeling

- // 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2011). Washington, USA, 2011. – P. 477–481.
- [37] Бугаев А. С., Буслаев А. П., Козлов В. В., Таташев А. Г., Яшина М. В. Моделирование трафика: монотонное случайное блуждание по сети // Матем. моделирование. – 2013. – Т. 25, № 8. – С. 3–21.
- [38] Бугаев А. С., Буслаев А. П., Козлов В. В., Таташев А. Г., Яшина М. В. Обобщенная транспортно-логистическая модель как класс динамических систем // Матем. моделирование. – 2015. – Т. 27, № 12. – С. 65–87.
- [39] Buslaev A.P., Gasnikov A.V., Yashina M.V. Mathematical Problems of Traffic Flow Theory // Proceedings of the 2010 International Conference on Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering, CMMSE - 2010. Almeria (Andalucia), Spain, 2010. – P. 307–313.
- [40] Buslaev A.P., Kozlov V.V. On a system of nonlinear differential equations for the model of totally connected traffic // J. Concr. Appl. Math. – 2014. – Vol. 12, № 1-2. – P. 86–93.
- [41] Буслаев А.П., Новиков А.В., Приходько В.М., Таташев А.Г., Яшина М.В. Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автомобильного движения. – М.: Мир, 2003. – 368 с.
- [42] Приходько В. М., Буслаев А.П. Стохастическое моделирование и оптимизация в автомобильном движении. – М.: МАДИ(ГТУ), 2003. – 171 с.
- [43] Буслаев А.П., Таташев А.Г., Яшина М.В. Математическая физика трафика. – М.: Технополиграфцентр, 2013. – 200 стр.
- [44] Car2Car Communication Consortium. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.car-to-car.org/>.
- [45] Ceder A. Transportation and Traffic Theory / Proceedings of the 14th

- International Symposium on Transportation and Traffic Theory. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1999. – 796 p.
- [46] Chandler R.E., Herman R., Montroll E.W. Traffic dynamics: studies in car following // Oper. Res. – 1958. – Vol. 6. – P. 165–184.
- [47] Chowdhury D., Santen L., Schadschneider A. Statistical Physics of Vehicular Traffic and Some Related Systems // Physics Reports. – 2000. – Vol. 329. – P. 199–329.
- [48] Cremer M. Der Verkehrsfluss auf Schnellstrassen. – Berlin: Springer, 1979. – P. 11–50.
- [49] Cowan R.J. Useful headway models // Trans. Rec. – 1976. – Vol. 9. – P. 371–375.
- [50] Colombo R.M. Hyperbolic Phase Transitions in Traffic Flow // SIAM J. Appl. Math. – 2003. – Vol. 63. – P. 708–721.
- [51] Daganzo C.F. The cell-transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory // Transp. Res. B. – 1994. – Vol. 28. – P. 269–287.
- [52] Daganzo C.F. The cell transmission model, part II: network traffic // Transp. Res. B. – 1995. – Vol. 29. – P. 79–93.
- [53] Daganzo C.F. Fundamentals of Transportation and Traffic Operations. – N. Y.: Elsevier Science Inc., 1997.
- [54] Daganzo C.F., Cassidy M.J., Bertini R.L. Possible explanations of phase transitions in highway traffic // Transp. Res. A. – 1999. – Vol. 33. – P. 365–379.
- [55] Davis L.C. Multilane simulations of traffic phases // Phys. Rev. E. – 2004. – Vol. 69. – 016108.
- [56] Davis L.C. Effect of adaptive cruise control systems on traffic flow // Phys. Rev. E. – 2004. – Vol. 69. – 066110.

- [57] Davis L.C. Controlling traffic flow near the transition to the synchronous flow phase // *Physica A.* – 2006. – Vol. 368. – P. 541–550.
- [58] Davis L.C. Effect of cooperative merging on the synchronous flow phase of traffic // *Physica A.* – 2006. – Vol. 361. – P. 606–618.
- [59] Davis L.C. Effect of adaptive cruise control systems on mixed traffic flow near an on-ramp // *Physica A.* – 2007. – Vol. 379. – P. 274–290.
- [60] Davis L.C. Driver choice compared to controlled diversion for a freeway double on-ramp in the framework of three-phase traffic theory // *Physica A.* – 2008. – Vol. 387. – P. 6395–6410.
- [61] Davis L.C. Nonlinear dynamics of autonomous vehicles with limits on acceleration // *Physica A.* – 2014. – Vol. 405. – P. 128–139.
- [62] Davis L.C. Improving traffic flow at a 2-to-1 lane reduction with wirelessly connected, adaptive cruise control vehicles // *Physica A.* – 2016. – Vol. 451. – P. 320–332.
- [63] Demir C., Kerner B.S., Herrtwich R.G., Klenov S.L., Rehborn H., Aleksic M., Reigber T., Schwab M., Haug A. FCD for urban areas: Method and analysis of practical applications // *Proceeding of ITS World Congress.* – 2003. – Paper No. 2392.
- [64] Dedicated Short Range Communications working group. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://grouper.ieee.org/groups/scc32/dsrc/index.html>.
- [65] Dion F., Rakha H., Kang Y.S. Comparison of delay estimates at under-saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections // *Transp. Res. B.* – 2004. – Vol. 38. – P. 99–122.
- [66] Edie L.C., Foote R.S. Traffic Flow in Tunnels // *Highway Res. Board Proc. Ann. Meeting.* – 1958. – Vol. 37. – P. 334–344.

- [67] Edie L.C., Foote R.S. Effect of Shock Waves on Tunnel Traffic Flow // Highway Research Board Proceedings. HRB, National Research Council, Washington, D.C. – 1960. – Vol. 39. – P. 492–505.
- [68] Edie L.C. Car-Following and Steady State Theory for Non-Congested Traffic // Operations Research. – 1961. – Vol. 9. – P. 66–77.
- [69] Edie L.C., Herman R., Lam T.N. Observed Multilane Speed Distribution and the Kinetic Theory of Vehicular Traffic // Transp. Sci. – 1980. – Vol. 14. – P. 55–76.
- [70] Elefteriadou L. An Introduction to Traffic Flow Theory. Springer Optimization and Its Applications. – Berlin: Springer, 2014. – Vol. 84. – 251 p.
- [71] Elefteriadou L., Kondyli A., Brilon W., Hall F.L., Persaud B., Washburn S. Enhancing Ramp Metering Algorithms with the Use of Probability of Breakdown Models // J. of Transp. Eng. – 2014. – Vol. 140. – 04014003.
- [72] Elefteriadou L., Roess R.P., McShane W.R. Probabilistic Nature of Breakdown at Freeway Merge Junctions // Transp. Res. Rec. – 1995. – Vol. 1484. – P. 80–89.
- [73] Fedotkin M.A., Fedotkin A.M., Kudryavtsev E.V. Construction and analysis of a mathematical model of spatial and temporal characteristics of traffic flows // Automatic Control and Computer Sciences. – 2014. – T. 48. – № 6. – C. 358-367.
- [74] Traffic and Granular Flow' 01 / Eds. M. Fukui, Y. Sugiyama, M. Schreckenberg, D.E. Wolf. – Heidelberg: Springer, 2003. – 579 p.
- [75] Gao K., Jiang R., Hu S.-X., Wang B.-H., Wu Q.-S. Cellular-automaton model with velocity adaptation in the framework of Kerner's three-phase traffic theory // Phys. Rev. E. – 2007. – Vol. 76. – 026105.
- [76] Gartner N.H., Messer C.J., Rathi A. // Special Report 165: Revised

Monograph on Traffic Flow Theory. Transportation Research Board, Washington DC, 1997. –

- [77] Gartner N.H., Stamatiadis Ch. Traffic Networks, Optimization and Control of Urban // Encyclopedia of Complexity and Systems Science / Ed. R.A. Meyers. – Berlin: Springer, 2009. – P. 9470–9500.
- [78] Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / Под ред. А.В. Гасникова. – 2-е изд. – М.: МЦНМО, 2013. – 427 с.
- [79] Гасников А.В. Об эффективной вычислимости конкурентных равновесий в транспортно-экономических моделях // Математическое моделирование. – 2015. – Т. 27. № 12. – С. 121–136.
- [80] Гасников А.В., Дорн Ю.В., Нестеров Ю.Е, Шпирко С.В. О трехстадийной версии модели стационарной динамики транспортных потоков // Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26:6. – С. 34–70.
- [81] Гасников А., Дорн Ю., Нурминский Е., Шамрай Н. Автомобильные пробки: когда рациональность ведет к коллапсу // Квант. – 2013. – №. 1. – С. 13-18.
- [82] Gazis D.C., Herman R., Potts R.B. Car-following theory of steady-state traffic flow // Oper. Res. – 1959. – Vol. 7. – P. 499–505.
- [83] Gazis D.C., Herman R., Rothery R.W. Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow // Oper. Res. – 1961. – Vol. 9. – P. 545–567.
- [84] Gipps P.G. Behavioral Car-Following Model for Computer Simulation // Trans. Res. B. – 1981. – Vol. 15. – P. 105–111.
- [85] Greenshields B.D., Bibbins J.R., Channing W.S., Miller H.H. A study of traffic capacity. // Highway Research Board Proceedings. – 1935. – Vol. 14. – P. 448–477.

- [86] Грибова В.В., Шамрай Н.Б., Федорищев Л.А. Моделирование транспортных потоков в развивающейся городской инфраструктуре с использованием инструментального комплекса для создания интерактивных виртуальных сред // Автоматика и телемеханика. – 2017. – Т. 2. – С. 50–64.
- [87] Gribova V.V., Shamray N.B., Fedorischev L.A. The traffic flow simulation in growing urban infrastructure with using a tool set for creating interactive virtual environment // VIII Moscow International Conference on Operation Research (ORM-2016). Moscow, October 17-22, 2016. – M: MAXPRESS, 2016. – Vol. 1. – P. 186–187.
- [88] He S., Guan W., Song L. Explaining traffic patterns at on-ramp vicinity by a driver perception model in the framework of three-phase traffic theory // Physica A. – 2010. – Vol. 389. – P. 825–836.
- [89] Haight F.A. Mathematical Theories of Traffic Flow. – N. Y.: Academic Press, 1963 – 242 p.
- [90] Hall F.L., Agyemang-Duah K. Freeway capacity drop and the definition of capacity // Trans. Res. Rec. – 1991. – Vol. 1320. – P. 91–98.
- [91] Hall F.L., Hurdle V.F., Banks J.H. Synthesis of recent work on the nature of speed-flow and flow-occupancy (or density) relationships on freeways // Transp. Res. Rec. – 1992. – Vol. 1365. – P. 12–18.
- [92] Hartenstein H., Laberteaux K. VANET vehicular applications and inter-networking technologies. – John Wiley & Sons, USA, 2009. – 435 p.
- [93] Helbing D. Traffic and related self-driven many-particle systems // Rev. Mod. Phys. – 2001. – Vol. 73. – P. 1067–1141.
- [94] Helbing D., Hennecke A., Treiber M. Phase Diagram of Traffic States in the Presence of Inhomogeneities // Phys. Rev. Lett. – 1999. – Vol. 82. – P. 4360–4363.

- [95] Traffic and Granular Flow' 99 / Eds. D. Helbing, H.J. Herrmann, M. Schreckenberg, D.E. Wolf. – Heidelberg: Springer, 2000. – 522 p.
- [96] Helbing D., Treiber M., Kesting A., Schönhof M. Theoretical vs. empirical classification and prediction of congested traffic states // Eur. Phys. J. B. – 2009. – Vol. 69. – P. 583–598.
- [97] Herman R., Montroll E.W., Potts R.B., Rothery R.W. Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Following // Oper. Res. – 1959. – Vol. 7. – P. 86–106.
- [98] Холодов Я. А., Алексеенко А. Е., Холодов А. С., Васильев М. О., Мишин В. Д. Разработка, калибровка и верификация модели движения трафика в городских условиях. Часть II // Компьютерные исследования и моделирование. – 2015. – Т. 7, № 6. – С. 1205–1219.
- [99] Traffic and Granular Flow' 03 / Eds. S.P. Hoogendoorn *et al.* – Heidelberg: Springer, 2005. – 601 p.
- [100] Hu X.-J., Wang W., Yang H. Mixed traffic flow model considering illegal lane-changing behavior: Simulations in the framework of Kerner's three-phase theory // Physica A. – 2012. – Vol. 391. – P. 5102–5111.
- [101] IEEE Std.802.11-1999, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. IEEE Std.802.11, 1999.
- [102] IEEE Std.802.11e/D4.4, Draft Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-speed Physical Layer the 5 GHz Band. IEEE Std.802.11a-1999, 1999.
- [103] IEEE Std.802.11a, Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS), June 2004.
- [104] Internet ITS Consortium. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.internetits.org>.

- [105] Jiang R., Hu M.-B., Wang R., Wu Q.-S. Spatiotemporal congested traffic patterns in macroscopic version of the Kerner-Klenov speed adaptation model // Phys. Lett. A. – 2007. – Vol. 365. – P. 6–9.
- [106] Jiang R., Hu M.-B., Zhang H.M., Gao Z.Y., Jia B., Wu Q.S. On some experimental features of car-following behavior and how to model them // Transp. Res. B. – 2015. – Vol. 80. – P. 338–354.
- [107] Jiang R., Wu Q.S. Spatial-temporal patterns at an isolated on-ramp in a new cellular automata model based on three-phase traffic theory // J. Phys. A: Math. Gen. – 2004. – Vol. 37. – P. 8197–8213.
- [108] Jiang R., Wu Q.S. Toward an improvement over Kerner-Klenov-Wolf three-phase cellular automaton model // Phys. Rev. E. – 2005. – Vol. 72. – 067103.
- [109] Jiang R., Wu Q.S. Dangerous situations in a synchronized flow model // Physica A. – 2007. – Vol. 377. – P. 633–640.
- [110] Карамзин Ю. Н., Трапезникова М. А., Четверушкин Б. Н., Чурбанова Н. Г. Двумерная модель автомобильных потоков // Матем. моделирование. – 2006. – Т. 18, № 6. – С. 85–95.
- [111] Kaufmann S., Kerner B.S., Rehborn H., Koller M., Klenov S.L. Aerial Observation of Inner City Traffic and Analysis of Microscopic Data at Traffic Signals // Transportation Research Board 96th Annual Meeting. – 2017. – TRB Paper 17-03078.
- [112] Kaufmann S., Kerner B.S., Rehborn H., Koller M., Klenov S. L. Aerial Observations of Moving Synchronized Flow Patterns in Over-Saturated City Traffic. // Transportation Research C. – 2018. – Vol. 86. – P. 393–406.
- [113] Kerner B.S. Theory of Congested Traffic Flow // Proceedings of the 3rd Symposium on Highway Capacity and Level of Service / Ed. R. Rysgaard. – 1998. – Vol. 2. – P. 621–642.

- [114] Kerner B.S. Empirical features of self-organization in traffic flow // Phys. Rev. Lett. – 1998. – Vol. 81. – P. 3797–3400.
- [115] Kerner B.S. Traffic Flow: Experiment and Theory // Traffic and Granular Flow'97 / Eds. M. Schreckenberg, D.E. Wolf. – Singapore: Springer, Singapore Pte. Ltd., 1998. – P. 239–267.
- [116] Kerner B.S. Congested Traffic Flow: Observations and Theory // Trans. Res. Rec. – 1999. – Vol. 1678. – P. 160–167.
- [117] Kerner B.S. The Physics of Traffic // Physics World. – 1999. – Vol. 12. – P. 25–30.
- [118] Kerner B.S. Theory of Congested Traffic Flow: Self-Organization without Bottlenecks // Transportation and Traffic Theory / Ed. A. Ceder. – Amsterdam: Elsevier Science, 1999. – P. 147–171.
- [119] Kerner B.S. Experimental features of the emergence of moving jams in free traffic flow // J. Physics A: Math. Gen. – 2000. – Vol. 33. – P. L221–L228.
- [120] Kerner B.S. Complexity of Synchronized Flow and Related Problems for Basic Assumptions of Traffic Flow Theories // Networks and Spatial Economics. – 2001. – Vol. 1. – P. 35–76.
- [121] Kerner B.S. Synchronized Flow as a New Traffic Phase and related Problems for Traffic Flow Modelling // Mathematical and Computer Modelling. – 2002. – Vol. 35. – P. 481–508.
- [122] Kerner B.S. Empirical macroscopic features of spatial-temporal traffic patterns at highway bottlenecks // Phys. Rev. E. – 2002. – Vol. 65. – 046138.
- [123] Kerner B.S. The Physics of Traffic. – Berlin, N. Y.: Springer, 2004. – 682 p.
- [124] Kerner B.S. Control of spatiotemporal congested traffic patterns at highway bottlenecks // Physica A. – 2005. – Vol. 355. – P. 565–601.

- [125] Kerner B.S. Control of spatiotemporal congested patterns at highway bottlenecks // IEEE Transactions on ITS. – 2007. – Vol. 8. – P. 308–320.
- [126] Kerner B.S. On-ramp metering based on three-phase traffic theory I // Traffic and Engineering Control. – 2007. – Vol. 48. – P. 28-35.
- [127] Kerner B.S. On-ramp Metering based on Three-Phase Theory – Part III // Traffic and Engineering Control. – 2007. – Vol. 48. – P. 68–75.
- [128] Kerner B.S. Three-Phase Traffic Theory and its Applications for Freeway Traffic Control // Transportation Research Trends / Ed. P.O. Inweldi. – N. Y.: Nova Science Publishers, Inc., 2007. – P. 1–97.
- [129] Kerner B.S. Traffic Congestion, Modelling Approaches to // Encyclopedia of Complexity and System Science / Ed. R.A. Meyers. – Berlin: Springer, 2009. – P. 9302–9355.
- [130] Kerner B.S. Traffic Congestion, Spatiotemporal Features of // Encyclopedia of Complexity and System Science / Ed. R.A. Meyers. – Berlin: Springer, 2009. – P. 9355–9411.
- [131] Kerner B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. – Berlin, N. Y.: Springer, 2009. – 265 p.
- [132] Kerner B.S. Criticism of generally accepted fundamentals and methodologies of traffic and transportation theory: A brief review // Physica A. – 2013. – Vol. 392. – P. 5261–5282.
- [133] Kerner B.S. Microscopic theory of traffic-flow instability governing traffic breakdown at highway bottlenecks: Growing wave of increase in speed in synchronized flow // Phys. Rev. E. – 2015. – Vol. 92. – 062827.
- [134] Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: a critical review // Elektrotechnik und Informationstechnik. – 2015. – Vol. 132. – P. 417–433.
- [135] Kerner B.S. Failure of classical traffic flow theories: Stochastic highway capacity and automatic driving // Physica A. – 2016. – Vol. 450. – P. 700–747.

- [136] Kerner B.S. The maximization of the network throughput ensuring free flow conditions in traffic and transportation networks: Breakdown minimization (BM) principle versus Wardrop's equilibria // Eur. Phys. J. B. – 2016. – Vol. 89. – Article: 199.
- [137] Kerner B.S. Breakdown minimization principle versus Wardrop's equilibria for dynamic traffic assignment and control in traffic and transportation networks: A critical mini-review // Physica A. – 2017. – Vol. 466. – P. 626–662.
- [138] Kerner B.S. Breakdown in Traffic Networks: Fundamentals of Transportation Science. – Berlin, N. Y.: Springer, 2017. – 652 p.
- [139] Kerner B.S. Traffic Networks, Breakdown in // Encyclopedia of Complexity and System Science / Ed. R.A. Meyers. – Springer Science+Business Media LLC, 2017.
- [140] Kerner B.S. Traffic Breakdown, Modelling Approaches to // Encyclopedia of Complexity and System Science / Ed. R.A. Meyers. – Springer Science+Business Media LLC, 2017.
- [141] Kerner B.S. Physics of Autonomous Driving based on Three-Phase Traffic Theory // arXiv:1710.10852v3, 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/1710.10852>.
- [142] Kerner B.S., Hemmerle P., Koller M., Hermanns G., Klenov S.L., Rehborn H., Schreckenberg M. Empirical synchronized flow in oversaturated city traffic // Physical Review E. – 2014. – Vol. 90, № 3. – 032810.
- [143] Kerner B.S., Hemmerle P., Koller M., Hermanns G., Klenov S.L., Rehborn H., Schreckenberg M. Empirical Synchronized Flow in Oversaturated City Traffic // VIII Московская международная конференция по исследованию операция (ORM2016). Москва, 17–22 октября, 2016. – М: МАКС пресс, 2016. – Т. 1. – С. 191–194.
- [144] Kerner B.S., Herrtwich R.G., Klenov S.L., Demir C., Rehborn H., Aleksic M., Haug A., Reigber T., Schwab M. Verkehrsstörungserkennung mit

- FCD-Fahrzeugen in Straßennetzen // Straßenverkehrstechnik. – 2005. № 7+8. – P. 320–326.
- [145] Kerner B.S., Herrtwich R.G., Klenov S.L., Demir C., Rehborn H., Aleksic M., Haug A., Reigber T., Schwab M. Traffic state detection with floating car data in road networks // Proceedings of the 8th Int. IEEE conference on IST. – 2005. – P. 700–705.
- [146] Kerner B.S., Herrtwich R.G., Klenov S.L., Rehborn H., Haug A., Aleksic M. Comparison of ASDA/FOTO application for tracking of spatiotemporal congested patterns on freeways // Preceeding of ITS World Congress. – 2003. – Paper No. 2371.
- [147] Kerner B.S., Klenov S.L. A microscopic model for phase transitions in traffic flow // Journal of Physics A: Mathematical and General. – 2002. – Vol. 35, № 3. – P. L31–L43.
- [148] Kerner B.S., Klenov S.L. Microscopic theory of spatial-temporal congested traffic patterns at highway bottlenecks // Physical Review E. – 2003. – Vol. 68, № 3. – 036130.
- [149] Kerner B.S., Klenov S.L. Spatial-temporal patterns in heterogeneous traffic flow with a variety of driver behavioural characteristics and vehicle parameters // Journal of Physics A: Mathematical and General. – 2004. – Vol. 37, № 37. – P. 8753–8788.
- [150] Kerner B.S., Klenov S.L. Comparison of congested pattern features at different freeway bottlenecks// Traffic and Granular Flow '03 / Eds. S.P. Hoogendoorn, S. Ludig, P.H.L. Bovy, M. Schreckenberg, D.E. Wolf. – Heidelberg, Berlin: Springer, 2005. – P. 141–160.
- [151] Kerner B.S., Klenov S.L. Probabilistic Breakdown Phenomenon at On-Ramps Bottlenecks in Three-Phase Traffic Theory // cond-mat/0502281, 2005. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0502281>.

- [152] Kerner B.S., Klenov S.L. Probabilistic breakdown phenomenon at on-ramp bottlenecks in three-phase traffic theory: Congestion nucleation in spatially non-homogeneous traffic // *Physica A*. – 2006. – Vol. 364. – P. 473–492.
- [153] Kerner B.S., Klenov S.L. Probabilistic breakdown phenomenon at on-ramp bottlenecks in three-phase traffic theory // *Transportation Research Record*. – 2006. – Vol. 1965. – P. 70–78.
- [154] Kerner B.S., Klenov S.L. Deterministic microscopic three-phase traffic flow models // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. – 2006. – Vol. 39, № 8. – P. 1775–1809.
- [155] Kerner B.S., Klenov S.L. Traffic Breakdown, Probabilistic Theory of // *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* / Ed. R.A. Meyers. – Berlin: Springer Science+Business Media LLC, 2009. – P. 9282–9302.
- [156] Kerner B.S., Klenov S.L. Phase transitions in traffic flow on multilane roads // *Physical Review E*. – 2009. – Vol. 80, № 5. – 056101.
- [157] Kerner B.S., Klenov S.L. A study of phase transitions on multilane roads in the framework of three-phase traffic theory // *Transportation Research Record*. – 2009. – Vol. 2124, – P. 67–77.
- [158] Kerner B.S., Klenov S.L. A theory of traffic congestion at moving bottlenecks // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. – 2010. – Vol. 43, № 42. – 425101.
- [159] Kerner B.S., Klenov S.L. Explanation of complex dynamics of congested traffic in NGSIM-data with three-phase traffic theory // *Proceedings of the Transportation Research Board 2010 Annual Meeting*. Washington DC: TRB, 2010. – Paper No.: 10-0454.
- [160] Kerner B.S. Traffic Breakdown, Mathematical Probabilistic Approaches to // *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* / Ed. R.A. Meyers. – Berlin: Springer Science+Business Media LLC, 2018.

- [161] Kerner B.S., Klenov S.L., Brakemeier A. Testbed for Wireless Vehicle Communication: a Simulation Approach based on Three-Phase Traffic Theory // Proc. Of 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. –2008. – P. 180–185.
- [162] Kerner, B.S., Klenov, S.L., Brakemeier A. Testbed for Wireless Vehicle Communication: a Simulation Approach based on Three-Phase Traffic Theory // Proc. of 4th Int. Workshop V2VCOM 2008. – 2008. –P. 57–63.
- [163] Kerner B.S., Klenov S.L., Brakemeier A. Enhancing Traffic Efficiency and Safety through the Use of Wireless Vehicle Communication // Traffic Engineering & Control. – 2010. – Vol. 51, № 6. – P. 217–222.
- [164] Kerner B.S., Klenov S.L., Brakemeier A. Testbed fo simulations of the effect of vehicle ad-hoc network on traffic flow: An approach based on three-phase traffic theory // Proceedings of the Transportation Research Board 2010 Annual Meeting. Washington, DC: TRB, 2010. – Paper No.: 10-0456.
- [165] Kerner B.S., Klenov S.L., Hermanns G., Hemmerle P., Rehborn H., Schreckenberg M. Synchronized flow in oversaturated city traffic // Physical Review E. – 2013. – Vol. 88, № 5. – 054801.
- [166] 36. Kerner B.S., Klenov S.L., Hermanns G., Schreckenberg M. A new cellular automaton approach for simulations of probabilistic features of vehicular traffic // Proceeding of 26th European Simulation and Modelling Conference - ESM'2012. – Essen, Germany, 2012. – P. 353–357.
- [167] Kerner B.S., Klenov S.L., Hermanns G., Schreckenberg M. Effect of driver over-acceleration on traffic breakdown in three-phase cellular automaton traffic flow models // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2013. – Vol. 392, № 18. – P. 4083–4105.
- [168] Kerner B.S., Klenov S.L., Hiller A. Criterion for traffic phases in single vehicle data and empirical test of a microscopic three-phase traffic theory

// Journal of Physics A: Mathematical and General. – 2006. – Vol. 39, № 9. – P. 2001 – 2020.

- [169] Kerner B.S., Klenov S.L., Hiller A. Empirical test of a microscopic three-phase traffic theory // Nonlinear Dynamics. – 2007. – Vol. 49. – P. 525–553.
- [170] Kerner B.S., Klenov S.L., Hiller A., Rehborn H. Microscopic features of moving traffic jams // Physical Review E. – 2006. – Vol. 73, № 4. – 046107.
- [171] Kerner B.S., Klenov S.L., Konhäuser P. Asymptotic theory of traffic jams // Physical Review E. – 1997. – Vol. 56, № 4. – P. 4200 – 4216.
- [172] Kerner B.S., Klenov S.L., Schreckenberg M. Simple cellular automaton model for traffic breakdown, highway capacity, and synchronized flow // Physical Review E. – 2011. – Vol. 84, № 4. – 046110.
- [173] Kerner B.S., Klenov S.L., Schreckenberg M. Probabilistic physical characteristics of phase transitions at highway bottlenecks: incommensurability of three-phase and two-phase traffic-flow theories // Physical Review E. – 2014. – Vol. 89, № 5. – 052807.
- [174] Kerner B.S., Klenov S.L., Schreckenberg M. Traffic breakdown at a signal: classical theory versus the three-phase theory of city traffic // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. – 2014. – № 3. – P03001.
- [175] Kerner B.S., Klenov S.L., Wolf D.E. Cellular automata approach to three-phase traffic theory // Journal of Physics A: Mathematical and General. – 2002. – Vol. 35, № 47. – P. 9971 – 10013.
- [176] Kerner B.S., Klenov S.L., Wolf D.E. Congestion due to merging roads: Predictions of three-phase traffic theory // Traffic and Granular Flow '03 / Eds. S.P. Hoogendoorn, S. Ludig, P.H.L. Bovy, M. Schreckenberg, D.E. Wolf. – Heidelberg, Berlin: Springer, 2005. – P. 161–172.
- [177] Kerner B.S., Koller M., Klenov S.L., Rehborn H., Leibel M. The physics of empirical nuclei for spontaneous traffic breakdown in free flow at highway

- bottlenecks // *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. – 2015. – Vol. 438. – P. 365–397.
- [178] Kerner B.S., Konhäuser P. Cluster effect in initially homogeneous traffic flow // *Phys. Rev. E*. – 1993. – Vol. 48. – P. R2335–R2338.
- [179] Kerner B.S., Konhäuser P. Structure and parameters of clusters in traffic flow // *Phys. Rev. E*. – 1994. – Vol. 50. – P. 54–83.
- [180] Kerner B.S., Konhäuser P., Schilke M. Deterministic spontaneous appearance of traffic jams in slightly inhomogeneous traffic flow // *Phys. Rev. E*. – 1995. – Vol. 51. – P. 6243–6246.
- [181] Kerner B.S., Konhäuser P., Schilke M. (1996) “Dipole-layer” effect in dense traffic flow // *Phys. Lett. A*. – 1996. – Vol. 215. – P. 45–56.
- [182] Kerner B.S., Rehborn H. Experimental features and characteristics of traffic jams // *Phys. Rev. E*. – 1996. – Vol. 53. – P. R1297–R1300.
- [183] Kerner B.S., Rehborn H. Experimental properties of complexity in traffic flow // *Phys. Rev. E*. – 1996. – Vol. 53. – P. R4275–R4278.
- [184] Kerner B.S., Rehborn H. Experimental properties of phase transitions in traffic flow // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – Vol. 79. – P. 4030–4033.
- [185] Kerner B.S., Rehborn H., Palmer J., Klenov S.L. Using probe vehicle to generate jam warning messages // *Traffic Engineering and Control*. – 2011. – Vol. 52, № 3. – P. 141–148.
- [186] Kerner B.S., Rehborn H., Schäfer R.P., Klenov S.L., Palmer J., Lorkowski S., Witte N. Traffic dynamics in empirical probe vehicle data studied with three-phase theory: Spatiotemporal reconstruction of traffic phases and generation of jam warning messages // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2013. – Vol. 392, № 1. – P. 221–251.
- [187] Киселев А.Б., Кокорева А.В., Никитин В.Ф., Смирнов Н.Н. Математическое моделирование автотранспортных потоков на регулируемых дорогах // *ПММ*. – 2004. – Т. 68, Вып. 6. – С. 1035–1042.

- [188] Киселев А.Б., Кокорева А.В., Никитин В.Ф., Смирнов Н.Н. Математическое моделирование движения двухполосного автотранспортного потока, регулируемого светофором. // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 1. Матем. Механ. – 2006. – № 4. – С. 35-40.
- [189] Кленов С.Л. Теория Кернера трех фаз в транспортном потоке — новый теоретический базис для интеллектуальных транспортных технологий // Труды МФТИ / Под ред. В.В. Козлова. – 2010. – Т. 2, № 4(8). – С. 75–89.
- [190] Knospe W., Santen L., A. Schadschneider A., Schreckenberg M. Disorder effects in cellular automata for two-lane traffic // Physica A. – 1999. – Vol. 265. – P. 614–633.
- [191] Knospe W., Santen L., Schadschneider A., Schreckenberg M. Towards a realistic microscopic description of highway traffic // J. Phys. A: Math Gen. – 2000. – Vol. 33. – P. L477–L485.
- [192] Knospe W., Santen L., Schadschneider A., Schreckenberg M. Single-vehicle data of highway traffic: Microscopic description of traffic phases // Phys. Rev. E. – 2002. – Vol. 65. – 056133.
- [193] Knospe W., Santen L., Schadschneider A., Schreckenberg M. Empirical test for cellular automaton models of traffic flow // Phys. Rev. E. – 2004. – Vol. 70. – 016115.
- [194] Kokubo S., Tanimoto J., Hagishima A. A new Cellular Automata Model including a decelerating damping effect to reproduce Kerner's three-phase theory // Physica A. – 2011. – Vol. 390. – P. 561–568.
- [195] Kometani E., Sasaki T. On the stability of traffic flow (Report I) // J. Oper. Res. Soc. Jap. – 1958. – Vol. 2. – P. 11–26.
- [196] Kometani E., Sasaki T. A Safety Index for Traffic with Linear Spacing // Oper. Res. – 1959. – Vol. 7. – P. 704–720.

- [197] Kozlov V.V., Buslaev A.P, Tatashev A.G. Monotonic random walks and clusters flows on networks. Models and traffic applications. – Saarbruecken: Lambert Academician Publishing, 2013. –300 p.
- [198] Kozlov V. V., Buslaev A. P., Bugaev A. S., Yashina M.V., Schadschneider A., Schreckenberg M. Traffic and Granular Flow '11. Traffic Networks and Intelligent Traffic Systems. – Berlin Heidelberg: Springer, 2013. – 488 p.
- [199] Koshi M. An Interpretation of a Traffic Engineer on Vehicular Traffic Flow // Traffic and Granular Flow'01 / Eds. M. Fukui, Y. Sugiyama, M. Schreckenberg, D.E. Wolf. – Heidelberg: Springer, 2003. – P. 199–210 .
- [200] Koshi M., Iwasaki M., Ohkura I. Some Findings and an Overview on Vehicular Flow Characteristics. // Proc. 8th International Symposium on Transportation and Traffic Theory / Ed. V.F. Hurdle. – Toronto: University of Toronto Press, 1983. – P. 403.
- [201] Krauß S., Wagner P., Gawron C. Metastable states in a microscopic model of traffic flow // Phys. Rev. E. – 1997. – Vol. 55. – P. 5597–5602.
- [202] Kühne R., Mahnke R., Lubashevsky I., Kaupužs J. Probabilistic description of traffic breakdown // Phys. Rev. E. – 2002. – Vol. 65. – 066125.
- [203] Kurtc V. V., Anufriev I. E. Multirate numerical scheme for large-scale vehicle traffic simulation // Matem. Mod. – 2016. – Vol. 28, № 5. – P. 124–134.
- [204] Kurtc V. V., Anufriev I. E. Car-following model with explicit reaction-time delay – linear stability analysis of the uniform solution on a ring // Matem. Mod. – 2017. – Vol. 29, № 4. – P. 88–100.
- [205] Laval J.A. Linking Synchronized Flow and Kinematic Waves // Traffic and Granular Flow' 05 / Eds. A. Schadschneider *et al.* – Berlin: Springer, 2007. – P. 521–526.

- [206] Lee H.K., Barlović R., Schreckenberg M., Kim D. Mechanical Restriction versus Human Overreaction Triggering Congested Traffic States // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – Vol. 92. – 238702.
- [207] Lee H.Y., Lee H.-W., Kim D. Dynamic states of a continuum traffic equation with on-ramp // *Phys. Rev. E.* – 1999. – Vol. 59. – P. 5101–5111.
- [208] Leuzbach W. *Introduction to the Theory of Traffic Flow.* – Berlin: Springer, 1988. – 204 p.
- [209] Li X.G., Gao Z.Y., Li K.P., Zhao X.M. Relationship between microscopic dynamics in traffic flow and complexity in networks // *Phys. Rev. E.* – 2007. – Vol. 76. – 016110.
- [210] Lighthill M.J., Whitham G.B. On kinematic waves. I Flow movement in long rivers. II A theory of traffic flow on long crowded roads // *Proc. Roy. Soc. A.* – 1955. – Vol. 229. – P. 281–345.
- [211] Lorenz M., Elefteriadou L. A probabilistic approach to defining freeway capacity and breakdown // *Trans. Res. Cir.* – 2000. – Vol. E-C018. – P. 84–95.
- [212] Лубашевский И.А., Гусейн-Заде Н.Г., Гарнисов К.Г. Макроскопические фазовые состояния автотранспортного потока в туннелях // *Труды института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.* – 2009. – Т. 65. – С. 50–68.
- [213] Луканин В.Н., Буслаев А.П., Трофименко Ю.В., Яшина М.В. *Автотранспортные потоки и окружающая среда.* – М.: Инфра-М, 1998. – 408 с.
- [214] Луканин В.Н., Буслаев А.П., Яшина М.В. *Автотранспортные потоки и окружающая среда - 2.* – М.: Инфра-М, 2001. – 640 с.
- [215] Lykov A.A., Malyshev V.A., Melikian M.V. Phase diagram for one-way

- traffic flow with local control // *Physica A.* – 2017. – Vol. 486. – P. 849–866.
- [216] Лыков А.А., Малышев В.А., Меликян М.В. Новые модели динамики транспортных потоков // *Современные проблемы математики и механики.* – 2015. – Т. 10, № 3. – С. 148-157.
- [217] Maerivoet S., De Moor B. Cellular automata models of road traffic // *Phys. Rep.* – 2005. – Vol. 419. – P. 1-64.
- [218] *Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the 16th Inter. Sym. on Transportation and Traffic Theory* / Ed. H.S. Mahmassani. – Amsterdam: Elsevier, 2005. – 796 p.
- [219] Mahnke R., Kaupužs J. Stochastic theory of freeway traffic // *Phys. Rev. E.* – 1999. – Vol. 59. – P. 117–125.
- [220] Mahnke R., Pieret N. Stochastic master-equation approach to aggregation in freeway traffic // *Phys. Rev. E.* – 1997. – Vol. 56. – P. 2666–2671.
- [221] Mahnke R., Kaupužs J., Lubashevsky I. Probabilistic description of traffic flow // *Phys. Rep.* – 2005. – Vol. 408. – P. 1–130.
- [222] Малинецкий Г. Г., Семенов В. В. Дорожное движение в контексте фундаментальных исследований // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша.* – 2007. – № 064. – 29 с.
- [223] Маслов С.А., Лубашевский И.А., Гусейн-заде Н.Г. Нелинейная динамика и фазовые переходы в системе с элементами, адаптирующими свое поведение к внешним условиям // *Сборник научных трудов. Школа молодых ученых «Перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем».* Радиоинфоком – 2015. 14–18 апреля 2015 г., г. Москва. – М: МГТУ МИРЭА, 2015. – С. 177–182.
- [224] Маслов С.А., Лубашевский И.А., Гусейн-заде Н.Г. Модель динамики социальных систем с учетом новизны и вознаграждения // *Первая*

- русская конференция «Социофизика и социоинженерия». МГУ им. М.В. Ломоносова, 8–11 июня 2015 г. – М.: Изд-во МГУ, 2015. – С. 89.
- [225] May A.D. Traffic Flow Fundamentals. – New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1990. – 476 p.
- [226] Molzahn S.-E., Kerner B.S., Rehborn H., Klenov S.L., Koller M. Analysis of speed disturbances in empirical single vehicle probe data before traffic breakdown // IET Intelligent Transport Systems. – 2017. – Vol. 11, Issue 9. – P. 604–612.
- [227] Морозов И.И., Гасников А.В., Тарасов В.Н., Холодов Я.А., Холодов А.С. Численное исследование транспортных потоков на основе гидродинамических моделей // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3, № 4. – С. 389–412.
- [228] Nagatani T. Modified KdV equation for jamming transition in the continuum models of traffic // Physica A. – 1998. – Vol. 261. – P. 599–607.
- [229] Nagatani T. Jamming transition in a two-dimensional traffic flow model // Phys. Rev. E. – 1999. – Vol. 59. – P. 4857–4864.
- [230] Nagatani T. The physics of traffic jams // Rep. Prog. Phys. – 2002. – Vol. 65. – P. 1331–1386.
- [231] Nagatani T, Nakanishi K. Delay effect on phase transitions in traffic dynamics // Phys. Rev. E. – 1998. – Vol. 57. – P. 6415–6421.
- [232] Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic // J. Phys. (France) I. – 1992. – Vol. 2. – P. 2221–2229.
- [233] Nagel K., Wagner P., Woessler R. Still Flowing: Approaches to Traffic Flow and Traffic Jam Modeling // Oper. Res. – 2003. – Vol. 51. – P. 681–716.
- [234] Nagel K., Wolf D.E., Wagner P., Simon P. Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach // Phys. Rev. E. – 1998. – Vol. 58. – P. 1425–1437.

- [235] Неймарк Ю. И., Федоткин М. А. О работе автомата, регулирующего уличное движение на перекрестке // Автомат. и телемех. – 1966. – № 3. – С. 78–87.
- [236] Network Simulator ns-2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [237] Neubert L., Santen L., Schadschneider A., Schreckenberg M. Single-vehicle data of highway traffic: A statistical analysis // Phys. Rev. E. – 1999. – Vol. 60. – P. 6480–6490.
- [238] Newell G.F. Nonlinear Effects in the Dynamics of Car Following // Operations Res. – 1961. – Vol. 9. – P. 209–229.
- [239] Newell G.F. Applications of Queuing Theory. – London: Chapman Hall, 1982. – 302 p.
- [240] Newell G.F. A simplified car-following theory: a lower order model // Trans. Res. B. – 2002. – Vol. 36. – P. 195–205.
- [241] Нурминский Е.А., Пугачев И.Н., Шамрай Н.Б., Седюкевич В.Н. Определение пассажиропотоков в региональной транспортной системе на основе модифицированных гравитационных моделей // Наука и техника. – Минск: Изд-во Белорусского национального технического университета, 2015. – № 5. – С. 39-45.
- [242] Нурминский Е.А., Пугачев И.Н., Шамрай Н.Б. Моделирование автомобильных корреспонденций региональной транспортной системы (на примере Иркутской области) // Вестник ТОГУ. – 2014. – № 4(35). – С.133-138.
- [243] Nurminski E.A., Shamray N. B. A case study of the regional transportation model // VII Moscow International Conference on Operations Research (ORM2013), October 15-19, 2013, Moscow. – M: MAXPRESS, 2013. – Vol. 1. – P. 266–267.

- [244] Нурминский Е.А., Шамрай Н.Б. Прогнозное моделирование автомобильного трафика Владивостока // ТРУДЫ МФТИ. – 2010. – Том 2, № 4, 119–129.
- [245] Нурминский Е.А., Федосеев А.А., Тормозов В.С. Автоматическое определение плотности автомобильного потока по данным камер // Информатика и системы управления. – 2014. – № 1. С. 151–159.
- [246] Okamura H., Watanabe S., Watanabe T. An empirical study of the capacity of bottlenecks on the basic suburban Expressway sections in Japan // Proc. 4th Int. Symp. on Highway Capacity, TRB Circular E-C018, Transportation Research Board, Washington, DC. – 2000. – P. 120–129.
- [247] Papageorgiou M. Application of Automatic Control Concepts in Traffic Flow Modeling and Control. – Berlin, N. Y.: Springer, 1983. – 186 p.
- [248] Papageorgiou M., Blosseville J.-M., Hadj-Salem H. Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Périphérique in Paris: Part I: Modelling // Transp. Res. Part A. – 1990. – Vol. 24A, № 5. – P. 345–359.
- [249] Papageorgiou M., Blosseville J.-M., Hadj-Salem H. Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Périphérique in Paris: Part II: Coordinated on-ramp metering // Transp. Res. Part A. – 1990. – Vol. 24A, № 5. – P. 361–370.
- [250] Papageorgiou M., Diakaki C., Dinopoulou V., Kotsialos A., Wang Y. Review of road traffic control strategies // Proceedings of the IEEE. – 2003. – Vol. 91. – P. 2043–2067.
- [251] Papageorgiou M., Hadj-Salem H., Blosseville J.-M. ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering // Transp. Res. Rec. – 1991. – Vol. 1320. – P. 58–64.
- [252] Papageorgiou M., Hadj-Salem H., Middelham F. ALINEA local ramp

- metering - summary of field results // *Transp. Res. Rec.* – 1997. – Vol. 1603. – P. 90–98.
- [253] Papageorgiou M., Kotsialos A. Freeway ramp metering: An overview // *Proceedings of the 3rd Annual IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2000)*, Dearborn, Michigan, USA. –2000. – P. 228-239.
- [254] Papageorgiou M., Kotsialos A. Freeway ramp metering: An overview // *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* – 2002. – Vol. 3(4). – P. 271–280.
- [255] Papageorgiou M., Papamichail I. Overview of traffic signal operation policies for ramp metering // *Transportation Research Record.* – 2008. – Vol. 2047. – P. 28–36.
- [256] Papageorgiou M., Wang Y., Kosmatopoulos E., Papamichail I. ALINEA maximizes motorway throughput - An answer to flawed criticism // *Traffic Eng. Control.* – 2007. – Vol. 48, № 6. – P. 271-276.
- [257] Parfenov D., Lubashevsky I., Goussein-Zade N. Non-Potential Phase Transitions Induced by Dynamical Traps // *HCCE2012, Proceedings of the Joint International Conference on Human-Centered Computer Environments.* – 2012. – P. 118–123.
- [258] Payne H.J. Models of Freeway Traffic and Control // *Simulation Councils Proc. Ser.: Mathematical Models of Public Systems* / Ed. G.A. Bekey. – 1971. – Vol. 1. – P. 51–60.
- [259] Payne H.J. FREEFLO: a macroscopic simulation model of freeway traffic // *Transp. Res. Rec.* – 1979. – Vol. 772. – P. 68–75.
- [260] Persaud B.N., Yagar S., Brownlee R. Exploration of the Breakdown Phenomenon in Freeway Traffic // *Trans. Res. Rec.* – 1998. – Vol. 1634. – P. 64–69.
- [261] Pipes L.A. An operational analysis of traffic dynamics // *J. Appl. Phys.* – 1953. – Vol. 24. – P. 274–287.

- [262] Pottmeier A., Thiemann C., Schadschneider A., Schreckenberg M. Mechanical Restriction versus Human Overreaction: Accident Avoidance and Two-Lane Simulations // *Traffic and Granular Flow' 05* / Eds. A. Schadschneider *et al.* – Berlin: Springer, 2007. – P. 503–508.
- [263] Prigogine I., Herman R. *Kinetic Theory of Vehicular Traffic.* – N. Y.: American Elsevier, 1971. – 100 p.
- [264] Qian Y.-S., Feng X., Jun-Wei Zeng J.-W. A cellular automata traffic flow model for three-phase theory // *Physica A.* – 2017. – Vol. 479. – P. 509–526.
- [265] Rakha H., Tawfik A. *Traffic Networks: Dynamic Traffic Routing, Assignment, and Assessment* // *Encyclopedia of Complexity and System Science* / Ed. R.A. Meyers. – Berlin: Springer, 2009. – P. 9429–9470.
- [266] Регирер С. А., Смирнов Н. Н., Ченчик А. Е. Математическая модель взаимодействия движущихся коллективов: общественного транспорта и пассажиров // *Автоматика и телемеханика.* – 2007. – Выпуск 7. – С. 116–131.
- [267] Rehborn H., Kerner B.S., Palmer J., Klenov S.L. Verkehrslagefusion für fahrzeuggesteuerte Kommunikationssysteme/Traffic data fusion for vehicle based communication systems // *Straßenverkehrstechnik.* – 2011. – Vol. 55, Heft 4. – P. 231-238.
- [268] Rehborn H., Klenov S.L. Traffic Prediction of Congested Patterns // *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* / Ed. R.A. Meyers. – Berlin: Springer, 2009. – P. 9500–9536.
- [269] Rehborn H., Klenov S.L., Koller M. Traffic Prediction of Congested Patterns // *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* / Ed. R.A. Meyers. – Berlin: Springer Science+Business Media LLC, 2017. – P.1–69.
- [270] Rehborn H., Klenov S.L., Palmer J. An empirical study of common traffic congestion features based on traffic data measured in the USA, the UK,

- and Germany // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2011. – Vol. 390, № 23. – P. 4466–4485.
- [271] Rehborn H., Klenov S.L., Palmer J. Common traffic congestion features studied in USA, UK, and Germany based on Kerner’s three-phase traffic theory // *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE. – 2011. – P. 19–24.
- [272] Richards P.I. Shockwaves on the highway // *Oper. Res.* – 1956. – Vol. 4. – P. 42–51.
- [273] Rickert M., Nagel K., Schreckenberg M., Latour A. Two lane traffic simulations using cellular automata // *Physica A*. – 1996. – Vol. 231. – P. 534–550.
- [274] *Traffic and Granular Flow’ 05. Proceedings of the International Workshop on Traffic and Granular Flow* / Eds. A. Schadschneider *et al.* – Berlin: Springer, 2007. – 738 p.
- [275] Schönhof M., Helbing D. Empirical Features of Congested Traffic States and their Implications for Traffic Modelling // *Transp. Sc.* – 2007. – Vol. 41. – P. 135–166.
- [276] Schönhof M., Helbing D. Criticism of three-phase traffic theory // *Transp. Res. B*. – 2009. – Vol. 43. – P. 784–797.
- [277] *Traffic and Granular Flow’ 97. Proceedings of the International Workshop on Traffic and Granular Flow* / Eds. M. Schreckenberg, D.E. Wolf. – Singapore: Springer, 1998. – 490 p.
- [278] Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков // *Автоматика и Телемеханика*. – 2003. – № 11. – С. 3–46.
- [279] Швецов В.И. Алгоритмы распределения транспортных потоков // *Автоматика и Телемеханика*. – 2009. – № 10. – С. 148–157.
- [280] Shvetsov V., Helbing D. Macroscopic Dynamics of Multi-Lane Traffic // *Physical Review E*. – 1999. – Vol. 59. – P. 6328–6339.

- [281] Семенов В.В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2004. – № 034. – 38 с.
- [282] Семенов В.В. Смена парадигмы в теории транспортных потоков // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2006. – № 046. – 32 с.
- [283] Семенов В.В. Математическое моделирование транспортного потока на нерегулируемом пересечении // Матем. моделирование. – 2008. – Т. 20, № 10. – С. 14–22.
- [284] Семенов В.В., Ермаков А.В. Исторический анализ моделирования транспортных процессов и транспортной инфраструктуры // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2015. – № 003. – 36 с.
- [285] Siebel F., Mauser W. Synchronized flow and wide moving jams from balanced vehicular traffic // Phys. Rev. E. – 2006. – Vol. 73. – 066108.
- [286] Smaragdis E., Papageorgiou M. Series of new local ramp metering strategies // Transp. Res. Rec. – 2003. – Vol. 1856. – P. 74–86.
- [287] Schmitz R., Torrent-Moreno M., Hartenstein H., Effelsberg W. The impact of wireless radio fluctuations on ad hoc network performance // Proceeding of 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, IEEE, Tampa, Florida, 2004. – 2004. – P. 594–601.
- [288] Smirnov N.N., Kiselev A.B., Nikitin V.F., Silnikov M.V., Manenkova A.S. Hydrodynamic traffic flow models and its application to studying traffic control effectiveness // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. – 2014. – Vol. 9. – P. 178–186.
- [289] Smirnova M.N., Bogdanova A.I., Smirnov N.N., Kiselev A.B., Nikitin V.F., Manenkova A.S. Multi-Lane Unsteady-State Traffic Flow Models // Journal of Mechatronics. – 2014. – Vol. 2, № 4. – P. 270–274.
- [290] Smirnova M.N., Pestov D.A., Bogdanova A.I., Smirnov N., Kiselev A.B., Nikitin V.F., Tyurenkova V.V. Multi-lane traffic flow models accounting

- for different lane changing motivations // *Recent Advances in Computer Science* / Ed. Zuojin Zhu. – University of Science and Technology of China, 2017. – Vol. 8. – P. 1–15.
- [291] Smirnova M.N., Pestov D.A., Bogdanova A.I., Smirnov N.N., Kiselev A.B., Nikitin V.F., Tyurenkova V.V. Multi-lane traffic flow models accounting for different lane changing motivations // *Proceedings of the 19th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2015)*. – 2015. – P. 314–319.
- [292] Sklar B. Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems, Part I: Characterization // *IEEE Communications Magazine*. – 1997. – Vol. 35. – P. 90–100.
- [293] Stokes E.E. On a difficulty in the theory of sound // *Phil. Mag.* – 1848. – Vol. 33. – P. 349–356.
- [294] Сухинова А.Б., Трапезникова М.А., Четверушкин Б.Н., Чурбанова Н.Г. Двумерная макроскопическая модель транспортных потоков // *Матем. моделирование*. – 2009. – Т. 21, № 2. – С. 118–126.
- [295] Takayasu M., Takayasu H. Phase transition and $1/f$ type noise in one dimensional asymmetric particle dynamics // *Fractals*. – 1993. – Vol. 1. – P. 860–866.
- [296] Tanga C.F., Jiang R., Wu Q.S. Phase diagram of speed gradient model with an on-ramp // *Physica A*. – 2007. – Vol. 377. – P. 641–650.
- [297] *Transportation and Traffic Theory in the 21st Century. Proceedings of the 15th International Symposium on Transportation and Traffic Theory* / Ed. M.A.P. Taylor. – Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2002. – 439 p.
- [298] Tian J.-F., Jiang R., Jia B., Gao Z.-Y., Ma S.F. Empirical analysis and simulation of the concave growth pattern of traffic oscillations // *Transp. Res. B*. – 2016. – Vol. 93. – P. 338–354.

- [299] Tian J.-F., Jiang R., Li G., Treiber M., Jia B., Zhu C.Q. Improved 2D intelligent driver model in the framework of three-phase traffic theory simulating synchronized flow and concave growth pattern of traffic oscillations // *Transp. Rec. F.* – 2016. – Vol. 41. – P. 55–65.
- [300] Tian J.-F., Li G., Treiber M., Jiang R., Jia N., Ma S.F. Cellular automaton model simulating spatiotemporal patterns, phase transitions and concave growth pattern of oscillations in traffic flow // *Transp. Rec. B.* – 2016. – Vol. 93. – P. 560–575.
- [301] Tian J.-F., Treiber M., Ma S.F., Jia B., Zhang W.Y. Microscopic driving theory with oscillatory congested states: Model and empirical verification // *Transp. Res. B.* – 2015. – Vol. 71. – P. 138–157.
- [302] Tilch B., Helbing D. Evaluation of Single Vehicle Data in Dependence of the Vehicle-Type, Lane, and Site // *Traffic and Granular Flow' 99* / Eds. D. Helbing, H.J. Herrmann, M. Schreckenberg, D.E. Wolf. – Berlin: Springer, 2000. – P. 333–338.
- [303] Tomer E., Safonov L., Havlin S. Presence of Many Stable Nonhomogeneous States in an Inertial Car-Following Model // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – Vol. 84. – P. 382–385.
- [304] The Fleetnet Project. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fleetnet.de>.
- [305] The Now: Network on Wheels Project. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.network-on-wheels.de>.
- [306] The WILLWARN Project. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.prevent-ip.org/en/>.
- [307] Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г. Двумерная модель клеточных автоматов для описания динамики транспортных потоков на элементах улично-дорожной сети // *Матем. моделирование.* – 2017. – Т. 29, № 9. – С. 110–120.

- [308] Чечина А.А., Герман М.С., Ермаков А.В., Трапезникова М.А., Чурбанова Н.Г. Моделирование и визуализация потоков автотранспорта на элементах улично-дорожной сети с использованием комплекса программ САМ-2D // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2016. – № 124. – 18 с.
- [309] Treiber M., Hennecke A., Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations // Phys. Rev. E. – 2000. – Vol. 62. – P. 1805–1824.
- [310] Treiber M., Kesting A. Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation. – Berlin: Springer, 2013. – 503 p.
- [311] Treiber M., Kesting A., Helbing D. Three-phase traffic theory and two-phase models with a fundamental diagram in the light of empirical stylized facts // Transp. Res. B. – 2010. – Vol. 44. – P. 983–1000.
- [312] Treiterer J. Improvement of Traffic Flow and Safety by Longitudinal Control // Transp. Res. – 1967. – Vol. 1. – P. 231–251.
- [313] Treiterer J., Taylor J.I. Traffic Flow Investigations by Photogrammetric Techniques // Highway Res. Rec. – 1966. – Vol. 142. – P. 1–12.
- [314] Treiterer J., Myers J.A The Hysteresis Phenomenon in Traffic Flow // Proc. 6th International Symposium on Transportation and Traffic Theory / Ed. D.J. Buckley. – London: A.H. & AW Reed, 1974. – P. 13–38.
- [315] Treiterer J. Investigation of Traffic Dynamics by Aerial Photogrammetry Techniques. Ohio State University Technical Report PB 246 094, Columbus, Ohio. – 1975. – 224 p.
- [316] Трапезникова М.А., Фурманов И.Р., Чурбанова Н.Г., Липп Р. Моделирование многополосного движения автотранспорта на основе теории клеточных автоматов // Матем. моделирование. – 2011. – Т. 23, № 6. – С. 133–146.

- [317] 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. – № 093. – 20 с.
- [318] Трапезникова М.А., Чечина А.А., Чурбанова Н.Г., Поляков Д.Б. Математическое моделирование потоков автотранспорта на основе макро- и микроскопических подходов // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. управление, вычисл. техн. информ. – 2014. – № 1. – С. 130–139.
- [319] Vehicle safety communications consortium. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/nrd-12/CAMP3/pages/VSCC.htm>.
- [320] Valuev A.M. Quasi-stationary Approach in Mathematical Modeling of Traffic Flows Dynamics in a City Road Network // Traffic and Granular Flow'11. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. – P. 413-418.
- [321] Wang R., Jiang R., Wu Q.S., Liu M. Synchronized flow and phase separations in single-lane mixed traffic flow // Physica A. – 2007. – Vol. 378. – P. 475–484.
- [322] Wang Y., Papageorgiou M., Messmer A. Predictive feedback routing control strategy for freeway network traffic // Proceedings of the 83rd Annual Transportation Research Board Meeting. – 2004. – TRB Paper No. 04-3429.
- [323] Wardrop J.G. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research // Proc. of Inst. of Civil Eng. II. – 1952. – Vol. 1. – P. 325–378.
- [324] Webster F.V. Traffic Signal Settings // Road research technical paper. – London: HMSO, 1958. – Paper No. 39.
- [325] Whitham G.B. Linear and Nonlinear Waves. – N. Y.: Wiley, 1974. – 638 p.

- [326] Whitham G.B. Exact solutions for a discrete system arising in traffic flow // Proc. R. Soc. London A. – 1990. – Vol. 428. – P. 49–69.
- [327] Wiedemann R. Simulation des Verkehrsflusses // Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe . – 1974. – Heft 8.
- [328] Wolf D.E. Cellular automata for traffic simulations // Physica A. – 1999. – Vol. 263. – P. 438–451.
- [329] Wolf D.E., Kerner B.S., Klenov S.L. Cellular automata for highway traffic // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2003. – Vol. 330, № 1-2. – P. 295–295.
- [330] Xiang Z.-T., Li Y.-J., Chen Y.-F., Xiong L. Simulating synchronized traffic flow and wide moving jam based on the brake light rule // Physica A. – 2013. – Vol. 392. – P. 5399–5413.
- [331] Холодов Я.А., Холодов А.С., Гасников А.В., Морозов И.И., Тарасов В.Н. Моделирование транспортных потоков - актуальные проблемы и перспективы их решения // Труды МФТИ. – 2010. – Т. 2, № 4. – С. 152-162.
- [332] Yang H., Lu J., Hu X.-J., Jiang J. A cellular automaton model based on empirical observations of a driver's oscillation behavior reproducing the findings from Kerner's three-phase traffic theory // Physica A. – 2013. – Vol. 392. – P. 4009–4018.
- [333] Замятин А.А., Малышев В.А. Транспортные автомобильные потоки - введение в вероятностный подход // Труды МФТИ. – 2010. – Т. 2, № 4. – С. 58-74.
- [334] Zurlinden H. Ganzjahresanalyse des Verkehrsflusses auf Straßen // Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum. – 2003. – Heft 26.