

## Динамические и агентные модели интеллектуальных транспортных систем

© 2024 г. Л.А. Бекларян, Г.Л. Бекларян, А.С. Акопов, Н.К. Хачатрян

**Л.А. Бекларян,**

ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: beklar@cemi.rssi.ru

**Г.Л. Бекларян,**

ЦЭМИ РАН, Москва, e-mail: glbeklaryan@gmail.com

**А.С. Акопов,**

ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: akopovas@umail.ru

**Н.К. Хачатрян,**

ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: nerses-khachatryan@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.07.2023

**Аннотация.** В статье представлены разработанные авторами математические и имитационные модели интеллектуальных транспортных систем (ИТС) — динамическая модель грузоперевозок и агентная модель ИТС «Манхэттенская решетка». Изучена проблема рационального железнодорожного планирования, относящаяся к исследованию режимов грузоперевозок и соответствующих им грузопотоков в рамках динамической системы. Выполнено моделирование процесса грузоперевозок с учетом механизма взаимодействия основных элементов железнодорожной инфраструктуры. Определены диапазоны изменения параметров, при которых система грузоперевозок может бесперебойно функционировать. На примере ИТС «Манхэттенская решетка» изучены возможности имитационного моделирования транспортных и пешеходных потоков на микроуровне с учетом сложных взаимодействий между гетерогенными агентами, в частности транспортными средствами (ТС) и пешеходами (V2P), ТС и ТС (V2V), ТС и инфраструктурными элементами (светофорами) (V2I) и т.д. Показано, что ИТС с частично регулируемые пешеходными переходами имеет преимущество по уровню суммарного трафика по сравнению с нерегулируемыми переходами, особенно при малоинтенсивном и высокоскоростном движении. Приведенные в статье модели объединяет единство их инструментального описания. Для моделей первого типа все действия на микроуровне строго регламентированы. Поэтому такие системы хорошо характеризуют установившиеся макропоказатели — состояния класса солитонных (решений типа бегущей волны). В моделях второго типа на микроуровне существуют большие флуктуации, которые влияют на безопасность участников движения (образование пробок, аварии и т.д.). Этим объясняется и применение агентных моделей, учитывающих процессы на микроуровне. Макропоказатели являются важнейшими характеристиками для проверки адекватности агентных моделей.

**Ключевые слова:** интеллектуальные транспортные системы, модели грузоперевозок, Манхэттенская решетка, агентное моделирование транспортных систем, моделирование дорожного движения, динамические транспортные системы, управление железнодорожным транспортом, умные светофоры.

**Классификация JEL:** C53, C63, R40, R41.

**УДК:** 519.876.5, 656.073.7, 656.11.

Для цитирования: Бекларян Л.А., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Хачатрян Н.К. (2024). Динамические и агентные модели интеллектуальных транспортных систем // Экономика и математические методы. Т. 60. № 2. С. 105–122. DOI: 10.31857/S0424738824020091

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из крупнейших базовых отраслей экономики любого государства является транспорт. Он обеспечивает географическую связанность территорий страны и координацию работы всех отраслей экономики. Транспорт создает условие для эффективного функционирования государства, а его развитие является важнейшим условием модернизации экономики. Транспорт помогает развитию международных экономических отношений, освоению новых экономических районов, обеспечению обороноспособности страны.

При описании интеллектуальных транспортных систем выделяют две группы моделей:

- динамические модели транспортных сетей и их загрузки, а также модели динамики грузоперевозок;
- агентные модели интеллектуальных транспортных систем (ИТС).

Для моделей первого типа все действия на микроуровне строго регламентированы. Такие системы хорошо характеризуются установившимися макропоказателями – состояниями класса солитонных решений (решений типа бегущей волны). В моделях второго типа наблюдаются большие флуктуации на микроуровне, влияющие на безопасность участников движения (образование пробок, аварии и т.д.). Чтобы этого избежать, применяются агентные модели, учитывающие процессы на микроуровне. Макропоказатели – состояния типа солитонных решений применяются для проверки адекватности агентных моделей. По сути, установившиеся состояния типа солитонных решений рассматриваются как нулевое приближение истинных состояний, и по ним происходит верификация агентной модели. В рассматриваемых агентных моделях транспортных потоков механизм, описывающий возникновение экстремальных состояний в системе, основан на понятии личного пространства агента. Он зависит от плотности окружающего пространства. Данная характеристика, введенная авторами в работах об управлении поведением толпы в экстремальных ситуациях, оказалась весьма плодотворной также и в моделях управления последствиями выбросов в атмосферу, что позволило описать процессы диффузии и поглощения в динамике атмосферных потоков.

*Первая группа транспортных моделей* представлена, в частности, такими моделями расчета корреспонденций, как гравитационная (Carrothers, 1956; Wilson, 1971), энтропийная (Harris, Wilson, 1978; Попков, 1995), модели семейства конкурирующих центров (Fotheringham, 1986), а также распределения потоков по сети (Shvetsov, 2009; Lo, Chen, 2000; Bar-Gera, 2002). Отдельно следует выделить класс динамических транспортных моделей, среди которых наиболее известными являются макроскопические (гидродинамические), кинетические (газодинамические) и микроскопические.

Макроскопические модели (Daganzo, 1995; Kuhne, 1984; Kerner, 2009; Гасников и др., 2013) описывают усредненные характеристики транспортного потока. Такие модели также называют гидродинамическими, потому что в них сам поток уподобляется движению несжимаемой жидкости. Макроскопические диаграммы, отображающие взаимосвязь между параметрами производительности (плотность движения, поток транспорта и скорость движения транспортных средств), используются для представления режимов движения и настроек системы (Daganzo, 2008; Geroliminis, Sun, 2011; Cassidy, Jang, Daganzo, 2011). Микроскопические модели описывают движение каждого транспортного средства. Они точнее макроскопических моделей отражают движение на отдельных участках транспортной сети, однако требуют больших вычислительных мощностей.

Первые микроскопические модели были предложены в 1950-е годы (Pipes, 1953; Швецов, 2003). Примерами таких моделей являются модели следования за лидером (Gazis, Herman, Rothery, 1961; Brackstone, McDonald, 2000), оптимальной скорости (Bando et al., 1998; Tomer, Safonov, Havlin, 2000), Трайбера (Treiber, Hennecke, Helbing, 2000), а также модели клеточных автоматов (Cremer, Ludwig, 1986; Chowdhury, Santen, Schadschneider, 2000). Кинетические модели занимают промежуточное место между макроскопическими и микроскопическими моделями. В них поток задается плотностью распределения транспортных средств в фазовом пространстве, при этом динамика фазовой плотности описывается кинетическим уравнением. Оно получается в результате усреднения результатов взаимодействия индивидуальных транспортных средств (Helbing, Treiber, 1998; Nelson, 1995).

Указанные выше модели наиболее приспособлены для исследования автомобильного трафика. В них также присутствуют случайные воздействия, связанные как с большим числом агентов в системе, так и с человеческим фактором.

Для такой географически протяженной страны, как Россия, особую роль играет железнодорожный транспорт. Он обеспечивает надежную и экономичную доставку грузов, особенно когда требуется быстрая доставка больших объемов. Публикации, посвященные железнодорожной логистике, по типу исследуемых задач можно разделить на три группы.

Первая группа представлена задачами проектирования инфраструктуры железнодорожной сети (Ferreira, Murray, 1997; Higgins, Ferreira, Kozan, 1995; Крау, Barker, Chen, 1991).

Во вторую группу вошли задачи управления парком локомотивов и вагонов. В зависимости от особенностей регулирования и рынка для каждого конкретного региона могут быть построены свои модели, учитывающие их ту или иную специфику. В качестве примера можно рассмотреть

работу (Fukasawa et al., 2002), в которой представлена модель, применяемая одним из крупнейших железнодорожных транспортных операторов на территории Латинской Америки. Другим примером является работа (Ceselli et al., 2008), в которой рассматривается сразу несколько моделей оптимизации доставки грузов швейцарской железнодорожной грузовой компанией «Cargo Express Service of Swiss Federal Railways». Ряд публикаций посвящен моделям, спроектированным с учетом особенностей рынка грузовых перевозок в Италии (Lulli, Pietropaoli, Ricciardi, 2011; Campetella et al., 2006). В других работах исследуются модели минимизации издержек транспортировки грузов по железнодорожной сети, охватывающей несколько европейских стран (Andersen, 2009; Jeong, Lee, Bookbinder, 2007). Также существуют модели, созданные для российского рынка железнодорожных перевозок (Sadykov et al., 2013; Лазарев, Садыков, 2014).

Третья группа моделей посвящена задачам железнодорожного планирования. До недавнего времени она в основном состояла из задач формирования расписания движения грузовых поездов (Лазарев и др., 2012; Cacchiani, Caprara, Toth, 2010; Liu, Dessouky, 2017). В последние годы ее стали дополнять исследования, посвященные применению макроскопической теории трафика для описания процессов, происходящих на железнодорожном транспорте. В работе (Weik, 2022) приведено теоретическое исследование свойств потока трафика на однонаправленных железнодорожных линиях. Построены макроскопические фундаментальные диаграммы и показано, как они позволяют определить режимы потока и различные фазы движения поездов, что может быть полезно для проектирования системы и планирования эксплуатации.

Еще одно направление исследований, активно развивающихся в последние годы, связано с прогнозированием возникающих в железнодорожной системе задержек. Поезда в этой системе следуют по заранее определенным расписаниям, что позволяет эффективно использовать маршруты и пути. Временные отклонения от такой запланированной работы являются обычным явлением. Они принимают форму задержек и снижают эффективность системы. Малые задержки часто поглощаются встроенными буферами и поэтому не влияют на процесс перевозок (Zieger, Weik, Niesen, 2018; Dekker, Panja, 2021). Однако время от времени нарушения в логистике (часто вызванные такими внешними факторами, как погода) приводят к перегрузкам или даже масштабной остановке перевозок с негативными последствиями для общества и экономики (Ludvigsen, Klaboe, 2014; Buchel, Spanninger, Corman, 2020). Большинство моделей, в которых изучаются задержки, основаны на расписаниях железнодорожной системы, где поезда являются агентами, которые могут нести задержки (Goverde, 2010; Gambardella, Rizzoli, Funk, 2002; Harrod, Cerreto, Nielsen, 2019). В противоположность этому в работе (Dekker et al., 2022) задержки фигурируют как переменные, связанные с узлами (станциями) и ребрами железнодорожной сети, которые остаются на своих местах. Распространение задержек между этими узлами не обязательно должно описываться в терминах дискретных поездов и событий, а может основываться исключительно на таких общих (или даже системных) величинах, как топология сети и расписание. Авторы (Dekker et al., 2022) проводят аналогию с гидродинамикой: тогда как традиционно задержки воспринимаются как лагранжевы частицы (т.е. следуют за поездами как жидкость, переносящая частицы), авторы предлагают рассматривать их с эйлеровой точки зрения (т.е. как входящие и исходящие задержки в фиксированной пространственной системе). Такое представление задержек названо распространением *типа диффузии*. На уровне микромасштаба следует ожидать, что такой нетрадиционный подход к обработке задержек будет менее точным, чем более подробные модели, но на большом масштабе производительность такой модели повысится. Модель содержит только простую информацию о расписании (например, частоты поездов и времена поездок). Вся информация модели составляет одну матрицу, что облегчает анализ свойств системы.

*Вторая группа транспортных моделей* представлена агентными моделями интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Так, например, имитационные модели ИТС класса «Манхэттенской решетки» были предложены в работах (Brassil, Choudhury, Maxemchuk, 1994; Heywood, Richmond, Maddock, 2015; Акоров, Beklaryan L., Beklaryan A., 2020; Sarma et al., 2021). При этом основное внимание в этих работах уделялось преимуществам и недостаткам дорожной сети на основе «Манхэттенской решетки» для города, проблемам формирования пробок и оптимизации трафика, сценарному моделированию развития дорожной ситуации для минимизации рисков возникновения ДТП и увеличения трафика выходного потока и др.

В настоящее время во многих крупных городских агломерациях наблюдается существенное увеличение трафика дорожного и пешеходного потоков, требующего построения интеллектуальных систем, в том числе с использованием наземных беспилотных транспортных средств (Акоров

et al., 2022; Акопов, Бекларян, 2022), «умных светофоров» (Акопов, Beklaryan, 2024; Бекларян А., Бекларян Л., Акопов, 2023) и других решений, направленных на оптимизацию трафика. Увеличение пробок на дорогах наносит существенный ущерб экономике города, в частности приводит к росту расходов на грузоперевозки, нерациональному расходу времени со стороны экономически активного населения, ухудшению экологической обстановки с отрицательными последствиями для здоровья населения, снижению производительности труда и замедлению экономического роста (Sweet, 2014; Samal, Mohanty, Santhakumar, 2021). Улучшение мобильности водителей и пешеходов чрезвычайно важны для экономики города: повышается доступность магазинов, торговых и развлекательных центров, объектов социальной инфраструктуры и т.д. В результате каждый человек за день успевает посетить большее число целевых объектов, приобрести большее число товаров и услуг и т.д. Поэтому в предложенной нами имитационной модели равное внимание уделяется динамике транспортных и пешеходных потоков, которые должны быть максимизированы. Для ИТС также изучаются макропоказатели в форме установившихся состояний класса солитонных решений. Такие модели имеют степень детализации потоков разных уровней. В исходной макромоделе (Акопов, Beklaryan, 2024; Beklaryan А., Beklaryan Л., Акопов, 2023) в узлах «Манхэттенской решетки» задается величина всего потока без детализации направлений движения агента.

## 1. МОДЕЛИ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК

Не менее важной проблемой железнодорожного планирования является исследование режимов грузоперевозок и соответствующих им грузопотоков в рамках динамической системы, описывающей процесс грузоперевозок в виде взаимодействия основных элементов железнодорожной инфраструктуры, в первую очередь станций. Такая проблема нашла отражение в работах (Beklaryan, Khachatryan, 2006; Бекларян, Хачатрян, 2013; Хачатрян, 2013; Khachatryan, Акопов, 2017; Khachatryan, Акопов, Belousov, 2018; Beklaryan, Khachatryan, Акопов, 2019; Khachatryan, 2020; Khachatryan, 2021; Хачатрян, Бекларян, 2021; Khachatryan, 2022). В них представлены динамические модели, в которых процесс организации грузоперевозок формирует грузопоток на основе взаимодействия станций. Правила взаимодействия станций зависят от характера спроса на грузоперевозки. При стабильно высоком спросе на грузоперевозки они направлены на использование в полном объеме технических возможностей станций. При отсутствии стабильно высокого спроса основной задачей взаимодействия станций является синхронизация входных и выходных потоков, что позволяет более эффективно осуществлять грузоперевозки, минимизировать задержки и обеспечивать плавный грузопоток.

Рассмотрим отдельно каждый случай.

В случае стабильно высокого спроса на грузоперевозки необходимо обеспечить загрузку определенного числа путей на станциях, которое представляет собой максимально возможное число задействованных путей на станциях, при котором гарантированно можно организовать бесперебойный грузопоток. Для исключения ситуаций, приводящих к сбою в системе грузоперевозок, при загрузке станций сверх указанного уровня необходимо часть грузов отправлять на временное хранение. Для этого предполагается создать специальные зоны хранения между станциями.

Одной из важных задач является организация системы контроля. Она призвана обеспечить вывод грузов из зон временного хранения. Рассматривается несколько конфигураций участка железнодорожной сети. Первая конфигурация представляет собой протяженный участок железнодорожной сети и подходит для описания транснациональных перевозок (например, перевозки по Транссибирской железнодорожной магистрали протяженностью более 9 тыс. км). Вторая конфигурация — замкнутая цепочка станций, третья — железнодорожная линия между двумя узловыми станциями. Модели, описывающие процесс организации грузоперевозок, задаются конечно разностным аналогом нелинейного параболического уравнения и нелокальными линейными ограничениями (система контроля).

Приведем описание этих моделей для трех конфигураций железнодорожной сети, представленной в работах авторов (Beklaryan, Khachatryan, 2006; Бекларян, Хачатрян, 2013; Khachatryan, Акопов, 2017; Khachatryan, Акопов, Belousov, 2018). *Важным и новым* здесь является программная (имитационная) реализация установившихся режимов грузоперевозок и изучение их зависимости от параметров системы.

Для *первой конфигурации* модель имеет вид:

$$\dot{z}_i(t) = \alpha z_{i-1} - 2\alpha z_i + \alpha z_{i+1} + \varphi(z_i), \quad i \in Z, \quad t \in [0, +\infty); \quad (1)$$

$$z_i(t) = z_{i+1}(t + \tau), \quad i \in Z, \quad t \in [0, +\infty), \quad (2)$$

где  $z_i(t)$  — число задействованных путей на станции  $i$  в момент времени  $t$ ;  $\alpha$  — параметр, определяющий взаимодействие соседних станций;  $\tau$  — параметр, характеризующий систему контроля. В уравнении (1) грузопоток разделен на две составляющие — диффузионную и конвективную. Диффузионная составляющая потока (линейная часть уравнения (1)) определяет порядок перераспределения грузов между соседними станциями для сглаживания потока. Коэффициент  $\alpha$  отвечает за нормативы переадресации грузов между соседними станциями. Если число задействованных путей на станции  $i-1$  больше, чем число задействованных путей на станции  $i$ , то  $i$  принимает грузы со станции  $i-1$  с интенсивностью  $\alpha(z_{i-1} - z_i)$ . В противном случае станция  $i$  с интенсивностью  $\alpha(z_i - z_{i-1})$  отправляет грузы в зону временного хранения. Если число задействованных путей на станции  $i$  больше числа задействованных путей на станции  $i+1$ , то  $i$  отправляет грузы на станцию  $i+1$  с интенсивностью  $\alpha(z_i - z_{i+1})$ . В противном случае станция  $i$  с интенсивностью  $\alpha(z_{i+1} - z_i)$  принимает грузы из зоны временного хранения. Параметр  $\tau$  описывает временной интервал сдвига единого замера потока на всех станциях. Очевидно, что величина параметра  $\tau$  должна быть сопоставима со временем перемещения грузов между соседними станциями. Эта величина не должна быть слишком большой, так как подобный контроль грузопотоков может оказаться неактуальным. Поэтому одной из задач является определение диапазонов изменения параметра  $\tau$ , при котором возникает установившийся грузопоток с заданной системой контроля.

Конвективная составляющая (нелинейная часть уравнения (1)) описывает движение грузов с учетом загруженности станций и основана на взаимодействии станции с соседними зонами временного хранения грузов (рис. 1). До тех пор пока число задействованных на станции путей не превышает критического значения  $\Delta$ , конвективная составляющая грузопотока применяется для приема грузов из зоны временного хранения, расположенного до станции. Как только число задействованных путей начинает превышать значение  $\Delta$ , конвективная составляющая грузопотока применяется для экстренного вывоза части грузов в зону временного хранения, расположенную после станции.

Отметим, что функция  $\varphi(\cdot)$  на полупрямой  $[\Delta, +\infty)$  является линейно убывающей (см. рис. 1) и, следовательно, вывоз грузов в зону временного хранения осуществляется с интенсивностью прямо пропорциональной превышению критического значения числа задействованных путей. Решения системы дифференциальных уравнений (1), удовлетворяющие условию (2) (решения системы (1)–(2)) называются решениями типа бегущей волны (солитонные решения), и определяют режимы грузоперевозок с заданной системой контроля. Доказано, что существует такой диапазон изменения характеристик системы контроля  $\tau$ , что для каждого значения характеристики системы контроля из этого диапазона имеется единственный режим грузоперевозок, удовлетворяющий заданной системе контроля (Beklaryan, Khachatryan, 2006).

Для второй конфигурации железнодорожной сети (замкнутая цепочка, состоящая из  $n$  станций) модель, описывающая процесс грузоперевозок с заданной системой контроля, имеет вид:

$$\dot{z}_1(t) = \alpha z_n - 2\alpha z_1 + \alpha z_2 + \varphi(z_1), \quad t \in [0, +\infty); \quad (3)$$

$$\dot{z}_i(t) = \alpha z_{i-1} - 2\alpha z_i + \alpha z_{i+1} + \varphi(z_i), \quad i = 2, \dots, n-1, \quad t \in [0, +\infty); \quad (4)$$

$$\dot{z}_n(t) = \alpha z_{n-1} - 2\alpha z_n + \alpha z_1 + \varphi(z_n), \quad t \in [0, +\infty); \quad (5)$$

$$z_i(t) = z_{i+1}(t + \tau), \quad i = 1, \dots, n-1, \quad t \in [0, +\infty); \quad (6)$$

$$z_n(t) = z_1(t + \tau), \quad t \in [0, +\infty). \quad (7)$$

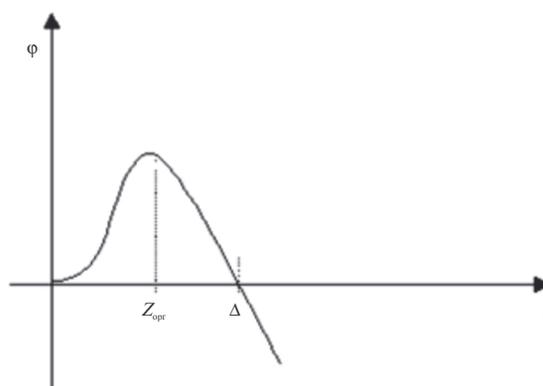


Рис. 1. График конвективной составляющей грузопотока

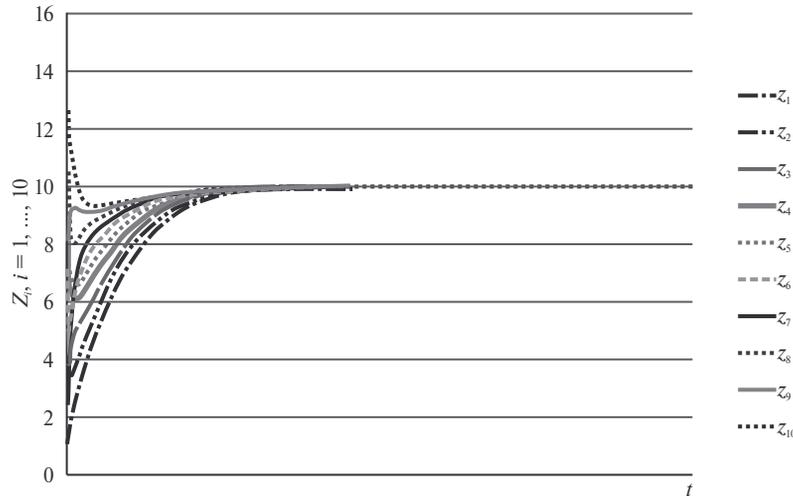


Рис. 2. Сходимость к стационарному решению

Показано, что всякое решение системы дифференциальных уравнений (3)–(5), удовлетворяющее условиям (6) и (7), является периодическим. Одним из таких решений является стационарное решение  $(\Delta, \Delta, \dots, \Delta)$ . Для выявления других решений изучены все решения системы дифференциальных уравнений (3)–(5) (т.е. не только решения типа бегущей волны, удовлетворяющие условиям (6)–(7)). Оказалось, что стационарное решение  $(\Delta, \Delta, \dots, \Delta)$  глобально асимптотически устойчиво в классе всех решений системы (3)–(5) (Бекларян, Хачатрян, 2013). Таким образом, система (3)–(7) не имеет другого решения, отличного от стационарного решения  $(\Delta, \Delta, \dots, \Delta)$ , однако любое решение системы (3)–(5) со временем становится сколь угодно близким к нему (рис. 2). Это означает, что организация грузоперевозок по замкнутой цепочке станций по определенным выше правилам взаимодействия станций всегда приводит к установлению максимально возможного стационарного грузопотока. Время установления такого режима зависит как от нормативного коэффициента взаимодействия соседних станций (параметр  $\alpha$ ), так и от интенсивности привлечения конвективной составляющей для экстренного освобождения станций.

Для *третьей конфигурации* железнодорожной сети (железнодорожная линия между двумя узловыми станциями) модель грузоперевозок с заданной системой контроля имеет вид:

$$\dot{z}_0(t) = \psi_1(t) - \alpha z_0 + \alpha z_1 + \varphi_0(z_0), \quad t \in [0, +\infty); \quad (8)$$

$$\dot{z}_i(t) = \alpha z_{i-1} - 2\alpha z_i + \alpha z_{i+1} + \varphi(z_i), \quad i = 1, \dots, m, \quad t \in [0, +\infty); \quad (9)$$

$$\dot{z}_{m+1}(t) = \alpha z_m - \alpha z_{m+1} - \psi_2(t) + \varphi(z_{m+1}), \quad t \in [0, +\infty); \quad (10)$$

$$z_i(t) = z_{i+1}(t + \tau), \quad i = 0, \dots, m, \quad t \in [0, +\infty). \quad (11)$$

Функция  $\varphi_0(\cdot)$  описывает вторую технологию на начальной узловой станции. На ней вторая технология используется только для разгрузки и поэтому она обладает следующими свойствами: на полупрямой  $(-\infty, \Delta]$  тождественно равна 0, а на полупрямой  $(\Delta, +\infty)$  является линейно убывающей. Функция  $\psi_1(\cdot)$  представляет собой интенсивность подачи грузов на начальную узловую станцию (определяет взаимодействие начальной узловой станции с железнодорожными направлениями, примыкающими к ней), а функция  $\psi_2(\cdot)$  — интенсивность распределения грузов с конечной узловой станции (взаимодействие конечной узловой станции с пунктами потребления грузов). Класс решений системы (8)–(11) чрезвычайно узок — система (8)–(11) не имеет решения за исключением случая, когда функции  $\psi_1(\cdot)$  и  $\psi_2(\cdot)$  тождественно равны нулю. Исследования показали невозможность организации грузопотока в рамках экзогенного взаимодействия начальной и конечной узловой станций с соответствующими объектами (при заданных экзогенных функциях  $\psi_1(\cdot)$  и  $\psi_2(\cdot)$ ). Это приводит к необходимости корректировки либо правил взаимодействия начальной станции и конечной узловых станций с соответствующими объектами, либо системы контроля. Как в первом, так и во втором случае формально речь идет о правильном расширении класса решений системы (8)–(11), которые назовем квазирешениями. Рассматривается два типа квазирешений. Первый тип предполагает эндогенные задания функций  $\psi_1(\cdot)$  и  $\psi_2(\cdot)$ , начиная с момента

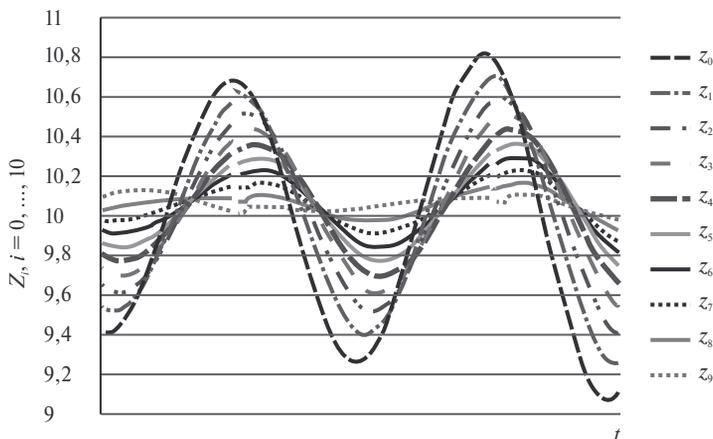


Рис. 3. Квазирешения первого типа

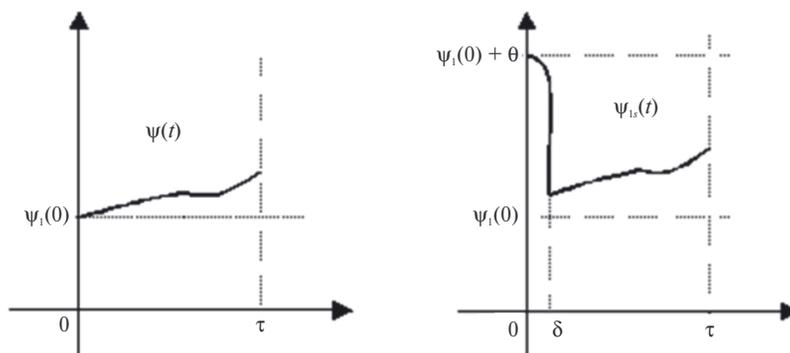


Рис. 4. Импульсное изменение функции  $\psi_1(\cdot)$  в начальный период времени

времени, равного характеристике системы контроля, и допускает разрывные решения (рис. 3), второй тип допускает малые нарушения в системе контроля (т.е. выполнение условия (11) с некоторой погрешностью).

В работе (Khachatryan, Akorov, 2017) исследована зависимость величин разрывов квазирешений системы (8)–(11) первого типа от параметров модели ( $\alpha, \tau$ , параметров функций  $\psi_1(\cdot), \psi_2(\cdot), \varphi_0(\cdot), \varphi(\cdot)$ ). Доказано, что эти разрывы можно сделать сколь угодно малыми (Beklaryan, Khachatryan, 2006). Для этого необходимо импульсно изменить функцию  $\psi_1(\cdot)$  в начальный период времени (рис. 4).

Исследование квазирешений второго типа приведено в работе (Khachatryan, Akorov, Belousov, 2018). Показано, как управляя параметрами модели, сделать погрешность в выполнении условия (11) сколь угодно малой.

Перейдем к случаю отсутствия *стабильно высокого спроса* на грузоперевозки, при котором нет необходимости в полной мере задействовать потенциал станций и формирования наличия специальных зон между станциями для временного хранения части грузов. В такой ситуации важно синхронизировать входные и выходные потоки на станциях. В работах (Khachatryan, 2021, 2022) построены модели организации грузоперевозок между двумя узловыми станциями, описывающие данную проблему. Основной характеристикой станции с номером  $i, i=0, \dots, m+1$  ( $0$  — номер начальной узловой станции,  $m+1$  — номер конечной узловой станции) в момент времени  $t$  является степень несогласованности между приемом и отправкой грузов, которая определяет дисбаланс между объемом входных и выходных грузов и задается функцией  $z_i$ , значения которой принадлежат отрезку  $[0, 1]$ . Начальная узловая станция принимает грузы в зависимости от спроса на перевозку и своего технического потенциала. Затем отправляет на следующую станцию в объеме ее технического потенциала. Каждая из промежуточных станций принимает грузы в объеме своего технического потенциала и отправляет в объеме технического потенциала следующей станции. Конечная

узловая станция принимает грузы в рамках своего технического потенциала и распределяет в некотором режиме. Технический потенциал станции с номером  $i$  характеризуется максимально допустимым приростом степени несогласованности между приемом и отправкой грузов и задается функцией  $\varphi_i(z)$ , меняющейся на отрезке  $[0, 1]$  и удовлетворяющей условию  $\varphi_i(1) = 0$ .

Когда технические потенциалы всех станций одинаковы, модель имеет следующий вид:

$$\dot{z}_0(t) = \min(d_0, \varphi(z_0(t))) - \lambda \varphi(z_1(t)), \quad t \in [t_0, +\infty); \quad (12)$$

$$\dot{z}_i(t) = \lambda [\varphi(z_i(t)) - \varphi(z_{i+1}(t))], \quad i = 1, \dots, m, \quad t \in [t_0, +\infty); \quad (13)$$

$$\dot{z}_{m+1}(t) = \lambda \varphi(z_{m+1}(t)) - d_{m+1}, \quad t \in [t_0, +\infty); \quad (14)$$

$$0 \leq z_i(t) \leq 1, \quad i = 0, 1, \dots, m+1, \quad t \in [t_0, +\infty), \quad (15)$$

где  $d_0 > 0$ ,  $0 < \lambda \leq 1$ ,  $d_{m+1} > 0$  — параметры модели;  $d_0$  — характеристика спроса на перевозки;  $\lambda$  — характеристика степени использования технического потенциала станций;  $d_{m+1}$  — характеристика режима распределения грузов с конечной узловой станции.

В (Khachatryan, 2022) определены диапазоны изменения параметров модели, при которых система грузоперевозок может бесперебойно функционировать, т.е. когда система (12)–(15) имеет решение. Исследована зависимость решений от параметров модели.

Случай, когда технические потенциалы станций различаются, описан в работе (Khachatryan, 2021). Показано, как, управляя параметрами, характеризующими степень использования технического потенциала станций и режим распределения грузов с конечной узловой станции, можно, как и в случае идентичности технических потенциалов станций, добиться снижения дисбаланса между входным и выходным потоками до наиболее приемлемых уровней на всех станциях цепи.

Для детального исследования свойств указанных моделей создадим имитационную модель, воспроизводящую процесс грузоперевозок в рамках указанных конфигураций железнодорожной сети. Для этого воспользуемся пакетом системно-динамического визуального моделирования Powersim. Модели строятся по переменным четырех типов: время, уровень, темп и вспомогательные переменные. Переменная «*время*» генерируется системным таймером и изменяется дискретно, т.е., начиная с некоторого начального значения, оно за каждый такт увеличивается на заданную величину, которая служит модельной единицей. Переменная типа «*уровень*» равна объему некоторого продукта, накопленного в некотором хранилище за время жизни модели с начального по текущий момент. Продукт может поступать в хранилище и извлекаться из него. Значение «уровня» в текущий момент времени вычисляется как сумма его значения в предыдущий момент и величины, равной разности величин входящего и выходящего потоков продукта за единицу времени. Переменная типа «*темп*» равна объему продукта, который поступает или извлекается из соответствующего уровня в единицу времени. Значение этой переменной может изменяться в зависимости от внешних воздействий на нее. Помимо уровней и темпов, при построении моделей динамических систем используются вспомогательные переменные. Эти переменные могут быть константами или математическими функциями от других переменных. В частности, с их помощью задаются параметры модели.

Приведем результаты имитационного моделирования процесса грузоперевозок системы (12)–(15), в которой технический потенциал станции является функцией  $\varphi(\cdot)$  вида  $\varphi(z) = a(1 - z)$ ,  $a > 0$  с характеристиками  $d_0$  и  $d_{m+1}$ :  $d_0 = \mu a$ ,  $0 < \mu \leq 1$ ,  $d_{m+1} = \gamma a$ ,  $\gamma > 0$ . Таким образом, имеем следующие параметры модели  $\mu$ ,  $a$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma$ :  $\mu$  ( $0 < \mu \leq 1$ ) — диапазон спроса на перевозки, который может быть удовлетворен при имеющемся техническом потенциале станций;  $a$  ( $a > 0$ ) — возможность станции наращивать грузопоток;  $\lambda$  ( $0 < \lambda \leq 1$ ) — степень использования технического потенциала станций;  $\gamma$  ( $\gamma > 0$ ) — режим распределения грузов с конечной узловой станции.

В работе (Khachatryan, 2022) доказано, что для произвольного значения спроса на перевозки  $\mu$ , который может быть удовлетворен при имеющемся техническом потенциале станций и согласованного с ним режима распределения грузов с конечной узловой станции ( $\gamma$ ), существует диапазон изменения степени использования технического потенциала станций ( $\lambda$ ) с началом в точке  $\mu$  — такой, что при любом значении  $\lambda$  из этого диапазона можно организовать бесперебойный грузопоток. Показано, что с точки зрения минимизации степени несогласованности между приемом и отправкой грузов на станциях параметр  $\gamma$  целесообразно взять равным параметру  $\mu$ . Однако зависимость указанного выше диапазона от иных параметров модели, а также ряд других важных свойств модели оставались в этой работе неизученными.

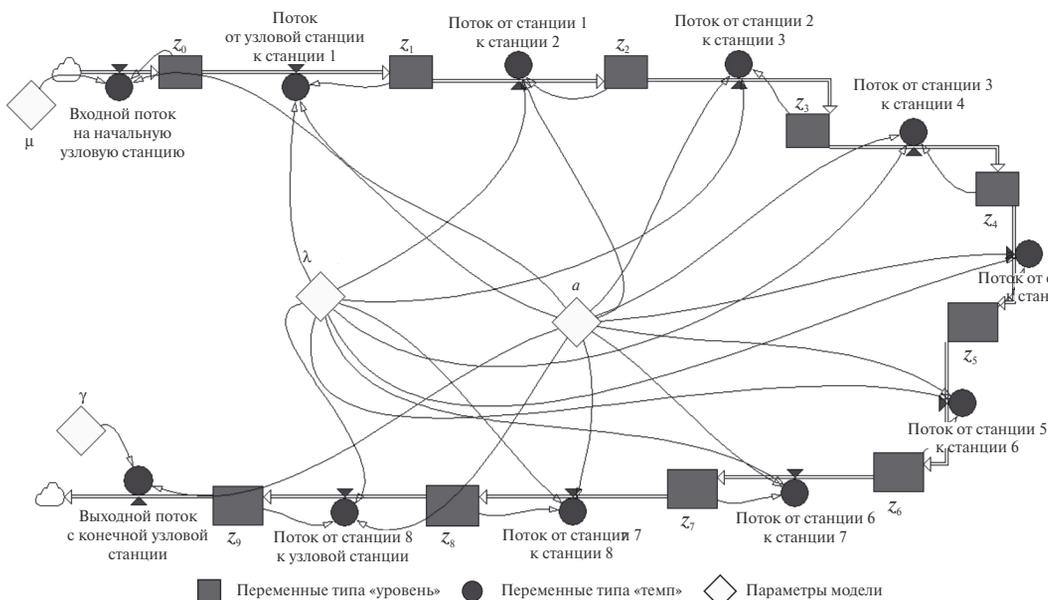


Рис. 5. Диаграмма имитационной модели

На рис. 5 представлена диаграмма построенной имитационной модели системы (12)–(15). В рамках такой модели, в частности, удастся определить диапазон изменения параметра  $\lambda$  в зависимости от параметров модели. Многочисленные эксперименты показали, что этот диапазон не зависит от параметра  $a$ . Как было отмечено ранее, минимальный уровень степени несогласованности между приемом и отправкой грузов на станциях достигается при  $\mu = \gamma$ . На рис. 6 приведен график зависимости диапазона  $\lambda$  от параметра  $\mu$ . Отметим, что построение имитационных моделей позволяет конструировать сложную конфигурацию реальных действующих систем грузоперевозок.

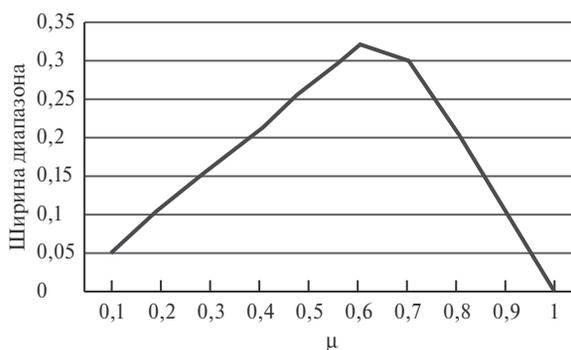


Рис. 6. Зависимость диапазона параметра  $\lambda$  существования решения задачи (12)–(15) от параметра  $\mu$

## 2. АГЕНТНЫЕ МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

### 2.1. Пример «Манхэттенской решетки»

Рассматривается транспортная система типа «Манхэттенская решетка» размерности  $N \times N$ , где  $N$  — число узлов. При этом в каждом таком узле обеспечивается возможность движения транспортных средств и пешеходов рис. 7.

Разработанная имитационная модель основывается на ранее предложенном феноменологическом подходе к изучению поведения «толпы», учитывающем механизм индивидуального принятия решений каждого агента при взаимодействиях с другими агентами (Акопов, Бекларян, 2015). При этом расширяется состав агентов (к пешеходам добавляются транспортные

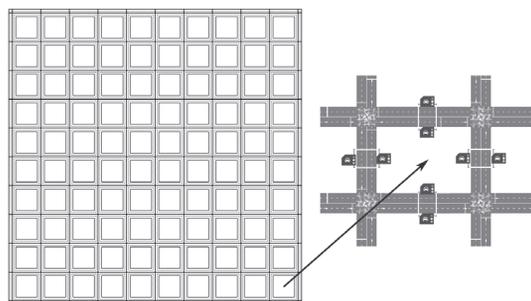
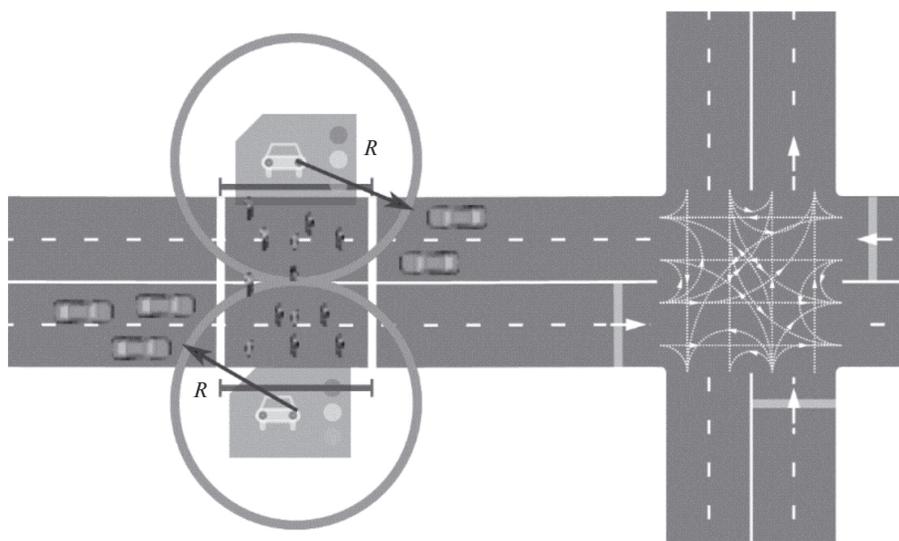
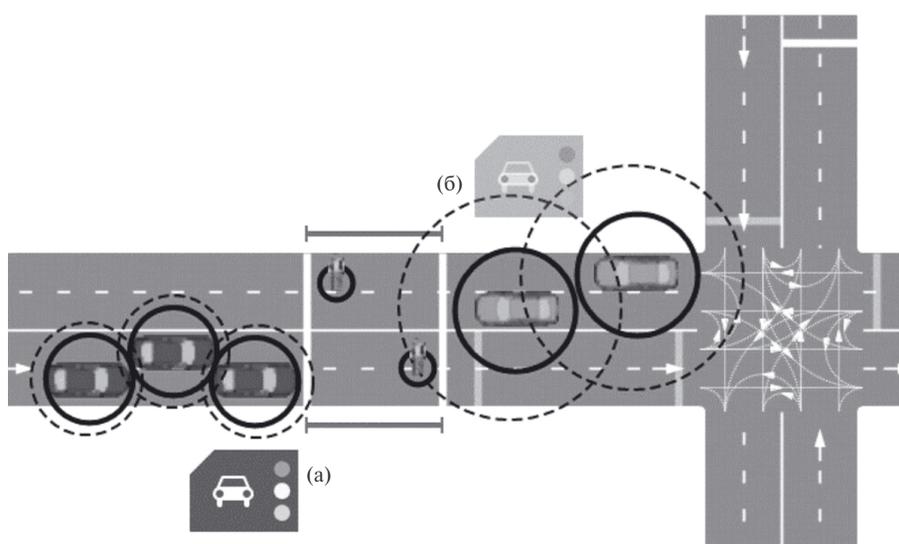


Рис. 7. Схема построения транспортной системы типа «Манхэттенская решетка» с регулируемым пешеходными переходами (справа приведен увеличенный фрагмент решетки)



**Рис. 8.** Иллюстрация регулирующего влияния светофоров на транспортные и пешеходные потоки



**Рис. 9.** Иллюстрация различного поведения ТС на регулируемом (а) и нерегулируемом (б) пешеходном переходах

средства), учитываются направления движения, задаваемые конфигурацией цифровой дорожной сети, и регулирующее воздействие светофоров.

Для моделирования движения транспортных средств (ТС) и пешеходов простые правила, основанные на анализе текущего сигнала светофора («К — красный», «Ж — желтый» или «З — зеленый») для ТС и пешеходов, находящихся в радиусе его действия и принимающих индивидуальные решения двигаться или остановиться (рис. 8).

Если агенты-ТС находятся в зоне действия включенного (действующего) светофора (т.е. вблизи регулируемого пешеходного перехода (рис. 9а), они выбирают минимальную зону обзора для оценки плотности дорожного и пешеходного потоков, уменьшая тем самым радиус личного пространства. Если агенты-ТС находятся в зоне действия выключенного светофора (т.е. вблизи

нерегулируемого пешеходного перехода (рис. 9б)), они стремятся существенно увеличить зону обзора, что обусловлено потребностью в большем времени для принятия решений о торможении, тем самым увеличивая радиус личного пространства.

При этом наиболее важными управляющими параметрами в рассматриваемой модели являются:

– состояния включенных светофоров, определяющие выполнение ими регулирующих функций на пешеходных переходах;

– длительности фаз светофоров, значения которых должны удовлетворять требованиям транспортной безопасности (чтобы пешеходы успевали перейти дорогу) и обеспечивать высокую пропускную способность ИТС для ТС и пешеходов с учетом плотности соответствующих потоков.

Введем обозначения:

–  $T = \{t_0, t_1, \dots, |T|\}$  – набор моментов времени (мин),  $|T|$  – общее число моментов времени,  $t_0 \in T$ ,  $t_{|T|} \in T$  – начальные и конечные моменты времени;

–  $I = \{i_1, \dots, i_{|I|}\}$  – набор индексов агентов (ТС и пешеходов), где  $|I|$  – общее число участников дорожного движения;

–  $L = \{l_1, \dots, l_{|L|}\}$  – набор индексов светофоров, где  $|L|$  – общее число светофоров;

–  $\{x_i(t_k), y_i(t_k)\}$ ,  $i \in I$  – координаты агента  $i$  в момент  $t_k$  ( $t_k \in T$ );

–  $v_i(t_{k-1})$ ,  $i \in I$  – предпочитаемая скорость движения агента  $i$  в момент  $t_{k-1}$  ( $t_{k-1} \in T$ );

–  $w_i(t_{k-1}) \in \{-1, 0, 1\}$ ,  $i \in I$  – параметр, задающий целевое направление движения агента  $i$  в «Манхэттенской решетке» в момент  $t_{k-1}$  ( $t_{k-1} \in T$ );

–  $\beta_{ij}(t_{k-1})$ ,  $i \in I$ ,  $j \in \{i : i \neq j\}$  – угол объезда (обхода) агентом  $i$  ближайшего препятствия (другого агента), расположенного на его пути по ходу движения (Акопов, Бекларян, 2015) в момент  $t_{k-1}$  ( $t_{k-1} \in T$ );

–  $\gamma_{ij}(t_{k-1})$ ,  $i \in I$ ,  $j \in \{i : i \neq j\}$  – угол, указывающий направление движения агента  $i$  – противоположное относительно ближайшего препятствия в момент  $t_{k-1}$  ( $t_{k-1} \in T$ );

–  $\tilde{\gamma}_{ij}(t_{k-1})$ ,  $i \in I$ ,  $j \in \{i : i \neq j\}$  – угол, указывающий направление агента  $i$  на ближайшее препятствие, расположенное по ходу движения или сбоку в момент  $t_{k-1}$  ( $t_{k-1} \in T$ );

–  $d_{ij}(t_{k-1})$ ,  $i \in I$ ,  $j \in \{i : i \neq j\}$  – расстояние от агента  $i$  до ближайшего агента-препятствия;

–  $\tilde{d}_{il}(t_{k-1})$ ,  $i \in I$ ,  $l \in L$  – расстояние от агента  $i$  до ближайшего светофора с заданным радиусом действия  $R_l$  (Акопов, Бекларян, 2024);

–  $r_i(t_{k-1})$ ,  $i \in I$  – радиус личного пространства агента в момент  $t_{k-1}$  ( $t_{k-1} \in T$ );

–  $s_l(t_{k-1}) \in \{1, 2, 3\}$ ,  $l \in L$  – состояния фаз светофора  $l$  в момент  $t_{k-1}$  ( $t_{k-1} \in T$ ):  $s_l(t_{k-1}) = 1$  – запрещающий сигнал светофора («красный»),  $s_l(t_{k-1}) = 2$  – предупреждающий сигнал светофора («желтый»),  $s_l(t_{k-1}) = 3$  – разрешающий сигнал светофора («зеленый»);

–  $\lambda$  – коэффициент, задающий соотношение масштабов реального и модельного времени;

–  $c$  – коэффициент, определяющий предельную скорость движения агента в противоположном от ближайшего препятствия (другого агента) направлении;

–  $\xi$  – коэффициент, используемый для оценки расположения препятствия перед агентом по ходу его движения (малое число).

Пространственная динамика ТС и пешеходов в момент времени  $t_k$  ( $t_k \in T$ ) задается системой конечно-разностных уравнений с переменной структурой:

$$x_i(t_k) = \begin{cases} x_i(t_{k-1}) + w_i(t_{k-1})\lambda v_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется I,} \\ x_i(t_{k-1}) + \lambda v_i(t_{k-1}) \cos(\pm \beta_{ij}(t_{k-1})) + \frac{A}{d_{ij}(t_{k-1})} \cos(\gamma_{ij}(t_{k-1})), & \text{если выполняется II,} \\ x_i(t_{k-1}) + \frac{c}{d_{ij}(t_{k-1})} \cos(\gamma_{ij}(t_{k-1})), & \text{если выполняется III,} \\ x_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется IV,} \end{cases} \quad (16)$$

$$y_i(t_k) = \begin{cases} y_i(t_{k-1}) + w_i(t_{k-1})\lambda v_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется I,} \\ y_i(t_{k-1}) + \lambda v_i(t_{k-1}) \sin(\pm \beta_{ij}(t_{k-1})) + \frac{A}{d_{ij}(t_{k-1})} \sin(\gamma_{ij}(t_{k-1})), & \text{если выполняется II,} \\ y_i(t_{k-1}) + \frac{A}{d_{ij}(t_{k-1})} \sin(\gamma_{ij}(t_{k-1})), & \text{если выполняется III,} \\ y_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется IV,} \end{cases} \quad (17)$$

при следующих условиях.

I.  $d_{ij}(t_{k-1}) > (r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1})) \quad \forall j \in \{i : i \neq j\}$  и  $s_l(t_{k-1}) = 3$  для ближайшего  $l \in L$ , что означает что на пути агента  $i$  ( $i \in I$ ) нет препятствия (другого участника дорожного движения) и при нахождении агента на регулируемом участке дороги действует разрешающий сигнал светофора (см. рис. 2);

II.  $d_{ij}(t_{k-1}) \leq (r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1}))$  и  $|\tilde{\gamma}_{ij}(t_{k-1})| \leq \xi$  для ближайшего  $j \in \{i : i \neq j\}$  и  $s_l(t_{k-1}) = 3$  для ближайшего  $l \in L$ , что означает что на пути агента  $i$  ( $i \in I$ ) есть препятствие, расположенное по ходу его движения (маневр обгона), и при нахождении агента на регулируемом участке дороги действует разрешающий сигнал светофора;

III.  $d_{ij}(t_{k-1}) \leq (r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1}))$  и  $|\tilde{\gamma}_{ij}(t_{k-1})| > \xi$  для ближайшего  $j \in \{i : i \neq j\}$  и  $s_l(t_{k-1}) = 3$  для ближайшего  $l \in L$ , что означает что на пути агента  $i$  ( $i \in I$ ) есть боковое препятствие, требующее сместиться в противоположном направлении (маневр смещения), а при нахождении агента на регулируемом участке дороги действует разрешающий сигнал светофора;

IV.  $\tilde{d}_{il}(t_{k-1}) \leq R_l$  и  $s_l(t_{k-1}) = 1$  для ближайшего  $l \in L$ , что означает что агент  $i$  ( $i \in I$ ) находится на регулируемом участке дороги и действует запрещающий сигнал светофора.

Система (16)–(17) позволяет вычислить пространственные координаты ТС и пешеходов и определить трафик выходного потока ИТС типа «Манхэттенская решетка». В частности, трафик выходного потока может быть оценен как суммарное число ТС и пешеходов, достигших своих целевых координат, либо как суммарное число агентов, нормированное на число пройденных ими фрагментов решетки (Акоров, Beklaryan, 2024).

Далее приведем пример численных экспериментов, выполненных с использованием разработанной имитационной модели ИТС на основе «Манхэттенской решетки», реализованной в системе крупномасштабного агентного моделирования FLAME GPU2 (Richmond et al., 2021).

## 2.2. Результаты численного моделирования ИТС

Численные эксперименты проводились на суперкомпьютере ЦЭМИ РАН DSWS PRO supercomputer (2x Intel Xeon Silver 4114, 1 x NVIDIA QUADRO RTX 6000) на ограниченном интервале времени  $|T| = 1000$  с.

На рис. 10 и 11 показаны примеры расчетов трафика ИТС типа «Манхэттенская решетка» с иллюстрацией пространственной динамики агентов при четырех сценариях реализации ИТС:

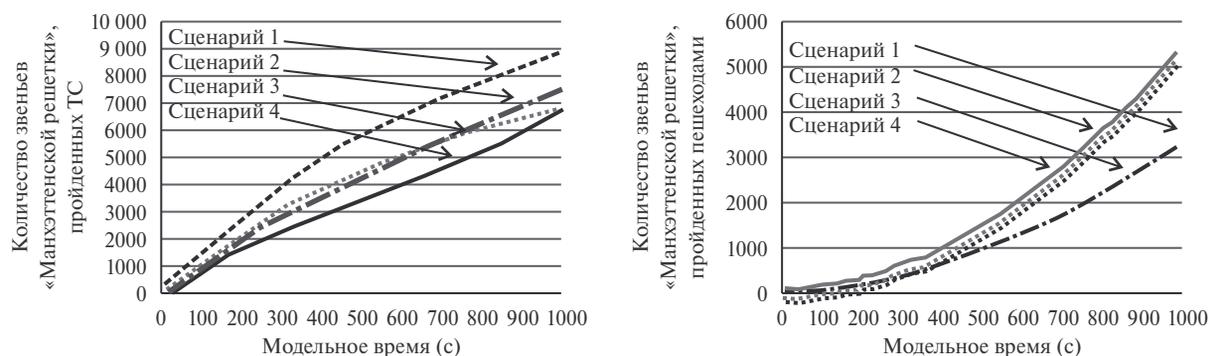
– **сценарий 1** — малоинтенсивное (1 ТС/мин и 1 пеш/мин) и высокоскоростное (80 км/ч) движения в транспортной системе типа «Манхэттенская решетка» с *полностью регулируемы*ми пешеходными переходами.

– **сценарий 2** — малоинтенсивное (1 ТС/мин и 1 пеш/мин) и высокоскоростное (80 км/ч) движения в ЦДС с *нерегулируемы*ми пешеходными переходами.

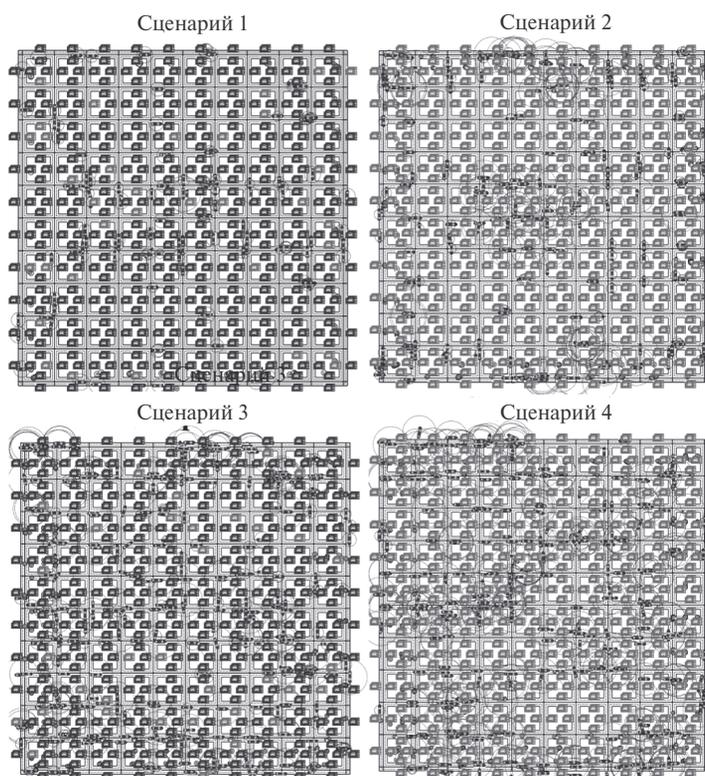
– **сценарий 3** — высокоинтенсивное (10 ТС /мин и 5 пеш/мин) и среднескоростное (60 км/ч) движения в ЦДС с *частично регулируемы*ми пешеходными переходами.

– **сценарий 4** — высокоинтенсивное (10 ТС /мин и 5 пеш/мин) и среднескоростное (60 км/ч) движения в ЦДС с *нерегулируемы*ми пешеходными переходами.

Для оценки трафика ИТС в каждый момент модельного времени вычисляется число звеньев «Манхэттенской решетки», пройденных агентами-ТС и пешеходами. Подобный критерий наилучшим образом характеризует пропускную способность ИТС типа «Манхэттенской решетки», так как учитывает влияние ее масштаба на поведение агентов, в частности отсутствие явной потребности у агентов проезжать все имеющиеся перекрестки и проходить все пешеходные переходы.



**Рис. 10.** Динамика трафика выходного потока для ИТС с полностью регулируемыми, частично регулируемыми и нерегулируемыми пешеходными переходами



**Рис. 11.** Пространственная динамика агентов для ИТС с полностью регулируемыми, частично регулируемыми и нерегулируемыми пешеходными переходами

Транспортная система типа «Манхэттенская решетка» с частично регулируемыми пешеходными переходами дает преимущество по уровню трафика ТС (оцениваемого по суммарному числу звеньев, пройденных агентами) по сравнению с ИТС нерегулируемыми переходами, особенно при малоинтенсивном и высокоскоростном движении (см. сценарий 1 в сравнении со сценарием 2). При высокоинтенсивном и среднескоростном трафике отказываться от светофоров также нецелесообразно, так как возможно формирование транспортного коллапса, отрицательно влияющего на транспортный поток (см. сценарий 3 в сравнении со сценарием 4).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены предложенные авторами математические и имитационные (агентные) модели интеллектуальных транспортных систем (ИТС). В частности, рассмотрены модели, предназначенные для исследования режимов грузоперевозок и соответствующих им

грузопотоков в рамках динамической системы, а также ИТС типа «Манхэттенская решетка», предназначенная для изучения автомобильного и пешеходного трафика. Разработанные модели используют системы дифференциальных и конечно-разностных уравнений с переменной структурой. Подобный подход, в частности, позволяет определить установившиеся режимы грузопотоков при различной конфигурации железнодорожной сети, изучить различные сценарии взаимодействия агентов, например V2V, V2P, V2I и др., определить оптимальные характеристики ИТС.

Первая группа моделей посвящена транспортным системам с жесткой регламентацией взаимодействий во всех ее подсистемах. Для таких систем наблюдаемыми величинами, на основе которых формируется стратегия управления, являются установившиеся макропоказатели—состояния класса солитонных решений (решения типа «бегущей волны»). Такие макропоказатели позволяют верифицировать имитационные модели процессов высокой сложности и детализации. Вторая группа моделей характеризуется высоким уровнем флуктуаций на микроуровне, что приводит к необходимости использовать агентные модели, способные их учитывать. Макропоказатели—состояния класса солитонных решений применяются здесь для верификаций агентных моделей. Основная трудность в изучении данных систем связана и с вычислительной сложностью таких задач, а их решение — с созданием эффективных генетических алгоритмов и успешной кластеризацией изучаемого большого ансамбля агентов.

В работе представлены численные примеры, подтверждающие возможность имитационного моделирования крупномасштабных ИТС с множественными взаимодействующими агентами при сложной конфигурации дорожной сети и различных сценарных условиях. А также определены характеристики ИТС, при которых обеспечивается улучшение (стабилизация) трафика транспортного и пешеходного потоков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Акопов А.С., Бекларян Л.А.** (2022). Моделирование динамики дорожно-транспортных происшествий с участием беспилотных автомобилей в транспортной системе «умного города» // *Бизнес-информатика*. Т. 16. № 4. С. 19–35. [**Akopov A.S., Beklaryan L.A.** (2022). Simulation of rates of traffic accidents involving unmanned ground vehicles within a transportation system for the ‘smart city’. *Business Informatics*, 16 (4), 19–35 (in Russian).]
- Акопов А.С., Бекларян Л.А.** (2015). Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях // *Автоматика и телемеханика*. № 10. С. 131–143. [**Akopov A.S., Beklaryan L.A.** (2015). An agent model of crowd behaviour in emergencies. *Automation and Remote Control*, 76 (10), 1817–1827 (in Russian).]
- Бекларян А.Л., Бекларян Л.А., Акопов А.С.** (2023). Имитационная модель интеллектуальной транспортной системы «умного города» с адаптивным управлением светофорами на основе нечёткой кластеризации // *Бизнес-информатика*. Т. 17. № 3. С. 70–86. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.3.70.86 [**Beklaryan A.L., Beklaryan L.A., Akopov A.S.** (2023). Simulation model of an intelligent transportation system for the ‘smart city’ with adaptive control of traffic lights based on fuzzy clustering. *Business Informatics*, 17, 3, 70–86 (in Russian).]
- Бекларян Л.А., Хачатрян Н.К.** (2013). Об одном классе динамических моделей грузоперевозок // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. Т. 53. № 10. С. 1649–1667. [**Beklaryan L.A., Khachatryan N.K.** (2013). On one class of dynamic transportation models. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 53 (10), 1466–1482 (in Russian).]
- Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б.** (2013). Введение в математическое моделирование транспортных потоков. А.В. Гасников (ред.). М.: МЦНМО. [**Gasnikov A.V., Klenov S.L., Nurminsky E.A., Kholodov Ya.A., Shamray N.B.** (2013). *Introduction to mathematical modeling of traffic flows*. A.V. Gasnikov (ed.). Moscow: Moscow Center for Continuous Mathematical Education (in Russian).]
- Лазарев А.А., Мусатова Е.Г., Гафаров Е.Р., Кварацхелия А.Г.** (2012). Теория расписаний. Задачи железнодорожного планирования. М.: ИПУ РАН. 92 с. [**Lazarev A.A., Musatova E.G., Gafarov E.R., Kvaratskhelia A.G.** (2012). *Schedule theory. Problems of railway planning*. Moscow: Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS. 92 p. (in Russian).]
- Лазарев А.А., Садыков Р.Р.** (2014). Задача управления парком грузовых железнодорожных вагонов. В сб.: «XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ 2014)». Москва, ИПУ РАН, 16–19 июня 2014. С. 5083–5093. [**Lazarev A.A., Sadykov R.R.** (2014). The task of managing the fleet of freight railway cars. In: *XII All-Russian Conference on Management Problems (VSPU2014)*. Moscow: Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS, June 16–19, 2014, 5083–5093 (in Russian).]
- Хачатрян Н.К.** (2013). Динамическая модель организации грузоперевозок при ограниченности емкостей перергонных путей // *Бизнес-информатика*. № 4 (26). С. 62–68. [**Khachatryan N.K.** (2013). Dynamic model of

organization of cargo transportation with a limited capacity of the distillation ways. *Business Informatics*, 4 (26), 62–68 (in Russian).]

- Хачатрян Н.К., Бекларян Л.А.** (2021). Исследование динамики потока в модели организации грузоперевозок по круговой цепочке станций // *Экономика и математические методы*. Т. 57. № 1. С. 83–91. [Khachatryan N.K., Beklaryan L.A. (2021). Study of flow dynamics in the model of cargo transportation organization along a circular chain of stations. *Economics and Mathematical Methods*, 57 (1), 83–91 (in Russian).]
- Швецов В.И.** (2003). Математическое моделирование транспортных потоков // *Автоматика и телемеханика*. № 11. С. 3–46. [Shvetsov V.I. (2003). Mathematical modelling of traffic flows. *Automation and Remote Control*, 64 (11), 1651–1689 (in Russian).]
- Акопов А.С., Beklaryan L.A., Beklaryan A.L.** (2020). Simulation-based optimization for autonomous transportation systems using a parallel real-coded genetic algorithm with scalable nonuniform mutation. *Cybernetics and Information Technologies*, 21 (3), 127–144.
- Акопов А.С., Beklaryan L.A., Thakur M.** (2022). Improvement of maneuverability within a multiagent fuzzy transportation system with the use of parallel bi-objective real-coded genetic algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23 (8), 12648–12664.
- Акопов А.С., Beklaryan L.A.** (2024). Traffic improvement in Manhattan road networks with the use of parallel hybrid biobjective genetic algorithm. *IEEE Access*, 12, 19532–19552.
- Andersen J., Christiansen M.** (2009). Designing new European rail freight services. *Journal of the Operational Research Society*, 60, 348–360.
- Bando M., Hasebe K., Nakanishi K., Nakayama A.** (1998). Analysis of optimal velocity model with explicit delay. *Physical Review. E*, 58, 5429–5435.
- Bar-Gera H.** (2002). Origin-based algorithm for the traffic assignment problem. *Transportation Science*, 36, 4, 398–417.
- Beklaryan L.A., Khachatryan N.K.** (2006). Traveling wave type solutions in dynamic transport models. *Functional Differential Equations*, 13, 2, 125–155.
- Beklaryan L.A., Khachatryan N.K., Akoпов A.S.** (2019). Model for organization cargo transportation at resource restrictions. *International Journal of Applied Mathematics*, 32, 4, 627–640.
- Brackstone M., McDonald M.** (2000). Car following: A historical review. *Transportation Research. F*, 2, 181–196.
- Brassil J., Choudhury A.K., Maxemchuk N.F.** (1994). The Manhattan street network: A high performance, highly reliable metropolitan area network. *Computer Networks and ISDN Systems*, 26, 6–8, 841–858.
- Buchel B., Spanninger T., Corman F.** (2020). Empirical dynamics of railway delay propagation identified during the large-scale Rastatt disruption. *Scientific Reports*, 10, 1. DOI: 10.1038/s41598-020-75538-z
- Cacchiani V., Caprara A., Toth P.** (2010). Scheduling extra freight trains on railway networks. *Transportation Research. B*, 44, 2, 215–231.
- Campetella M., Lulli G., Pietropaoli U., Ricciardi N.** (2006). Freight service design for the Italian railways company. In: *Proceedings of the 6th Workshop on Algorithmic Approach for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS2006)*. Zurich, Switzerland, 14 September 2006, 1–13.
- Carrothers G.A.P.** (1956). An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction. *Journal of the American Institute of Planners*, 22, 94–102.
- Cassidy M.J., Jang K., Daganzo C.F.** (2011). Macroscopic fundamental diagrams for freeway networks: Theory and observation. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2260, 8–15.
- Ceselli A., Gatto M., Lübbecke M., Nunkesser M., Schilling H.** (2008). Optimizing the cargo express service of Swiss Federal Railways. *Transportation Science*, 42, 4, 450–465.
- Chowdhury D., Santen L., Schadschneider A.** (2000). Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. *Physics Reports*, 329, 199–329.
- Cremer M., Ludwig J.** (1986). A fast simulation model for traffic flow on the basis of Boolean operations. *Mathematics and Computers in Simulation*, 28, 297–303.
- Daganzo C.F.** (1995). The cell transmission model. Part II: Network traffic. *Transportation Research. B*, 29, 79–93.
- Daganzo C.F.** (2008). An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research. B*, 42, 9, 771–781.
- Dekker M., Medvedev A., Rombouts J., Siudem G., Tupikina L.** (2022). Modelling railway delay propagation as diffusion-like spreading. *EPJ Data Science*, 11, 44. DOI: 10.1140/epjds/s13688-022-00359-1
- Dekker M.M., Panja D.** (2021). Cascading dominates large-scale disruptions in transport over complex networks. *PLoS ONE*, 16, 1, 1–17.

- Ferreira L., Murray M.H.** (1997). Modelling rail track deterioration and maintenance: Current practices and future needs. *Transport Reviews*, 17, 3, 207–221.
- Fotheringham A.S.** (1986). Modelling hierarchical destination choice. *Environment and Planning. A*, 18, 401–418.
- Fukasawa R., Arago M.P., Porto O., Uchoa E.** (2002). Solving the freight car flow problem to optimality. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 66, 6, 42–52.
- Gambardella L.M., Rizzoli A.E., Funk P.** (2002). Agent-based planning and simulation of combined rail/road transport. *Simulation*, 78, 5, 293–303.
- Gazis D.C., Herman R., Rothery R.W.** (1961). Nonlinear follow the leader models of traffic flow. *Operations Research*, 9, 4, 545–567.
- Geroliminis N., Sun J.** (2011). Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic. *Transportation Research. B*, 45, 3, 605–617.
- Goverde R.M.P.** (2010). A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks. *Transportation Research. C*, 18, 3, 269–287.
- Harris B., Wilson A.G.** (1978). Equilibrium values and dynamics of attractiveness terms in production-constrained spatial-interaction models. *Environment and Planning. A*, 10, 371–388.
- Harrod S., Cerreto F., Nielsen O.A.** (2019). A closed form railway line delay propagation model. *Transportation Research. C*, 102, 189–209.
- Helbing D., Treiber M.** (1998). Gas-kinetic-based traffic model explaining observed hysteretic phase transition. *Physical Review Letters*, 81, 3042–3045.
- Heywood P., Richmond P., Maddock S.** (2015). Road network simulation using FLAME GPU. In: *Euro-Par 2015: Parallel Processing Workshops. Euro-Par 2015 International Workshops*, 24–25 Aug 2015, 2015. Vienna (Austria). Lecture Notes in Computer Science, 9523. Springer (Cham.), 430–441. ISBN: 978-3-319-27307-5.
- Higgins A., Ferreira L., Kozan E.** (1995). Modeling single-line train operations. *Transportation Research Record*, 1489, 9–16.
- Jeong S.-J., Lee C.-G., Bookbinder J.** (2007). The European freight railway system as a hub-and-spoke network. *Transportation Research. A*, 41, 6, 523–536.
- Kerner B.S.** (2009). *Introduction to modern traffic flow theory and control: The long road to three-phase traffic theory*. Berlin: Springer.
- Khachatryan N.** (2022). Bifurcation in the model of cargo transportation organization. *Advances in Systems Science and Applications*, 22, 4, 79–91.
- Khachatryan N.K.** (2020). Study of flow dynamics in the model of cargo transportation organization between node stations. *International Journal of Applied Mathematics*, 33, 5, 937–949.
- Khachatryan N.K.** (2021). Modeling the process of cargo transportation between node stations. *International Journal of Applied Mathematics*, 34, 6, 1223–1235.
- Khachatryan N.K., Akopov A.S.** (2017). Model for organizing cargo transportation with an initial station of departure and a final station of cargo distribution. *Business Informatics*, 1, 25–35.
- Khachatryan N.K., Akopov A.S., Belousov F.A.** (2018). About quasi-solutions of traveling wave type in models for organizing cargo transportation. *Business Informatics*, 1, 43, 61–70.
- Kraay D., Barker P.T., Chen B.T.** (1991). Optimal pacing of trains in freight railroads: Model formulation and solution. *Operations Research*, 39, 1, 82–99.
- Kuhne R.D.** (1984). Macroscopic freeway model for dense traffic stop-start waves and incident detection. *Proceedings of Ninth International Symposium on Transport and Traffic Theory*. R. Hamerslag (ed.). Utrecht: VNU Science, 21–42.
- Liu L., Dessouky M.** (2017). A decomposition based hybrid heuristic algorithm for the joint passenger and freight train scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 87, 165–182.
- Lo H.K., Chen A.** (2002). Traffic equilibrium problem with route-specific costs: Formulation and algorithms. *Transportation Research. B*, 34, 6, 493–513.
- Ludvigsen J., Klaboe R.** (2014). Extreme weather impacts on freight railways in Europe. *Natural Hazards*, 70, 1, 767–787.
- Lulli G., Pietropaoli U., Ricciardi N.** (2011). Service network design for freight railway transportation: The Italian case. *Journal of the Operational Research Society*, 62, 12, 2107–2119.
- Nelson P.** (1995). A kinetic model of vehicular traffic and its associated bimodal equilibrium solutions. *Transport Theory and Statistical Physics*, 24, 383–409.
- Pipes L.A.** (1953). An operational analysis of traffic dynamics. *Journal of Applied Physics*, 24, 274–281.

- Popkov Yu.S.** (1995). *Macrosystems theory and its applications*. Berlin: Springer Verlag.
- Richmond P., Chisholm R., Heywood P., Leach M., Kabiri Chimeh M.** (2021). FLAME GPU. *ZENODO*. Available at: <https://zenodo.org/records/5465845>
- Sadykov R., Lazarev A., Shiryaev V., Stratonnikov A.** (2013). Solving a freight railcar flow problem arising in Russia. In: *13th Workshop on Algorithmic Approach for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS'13)*. Sophia Antipolis, France, 5 September 2013, 55–67.
- Samal S.R., Mohanty M., Santhakumar S.M.** (2021). Adverse effect of congestion on economy, health and environment under mixed traffic scenario. *Transportation in Developing Economies*, 7, 15. DOI: 10.1007/s40890-021-00125-4
- Sarma S.S., Sinha K., Sub-r-pa C., Chakraborty G., Sinha B.P.** (2021). Optimal distribution of traffic in Manhattan road networks for minimizing routing-time. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22, 11, 6799–6820.
- Shvetsov V.I.** (2009). Algorithms for distributing traffic flows. *Automation and Remote Control*, 70, 10, 1728–1736.
- Sweet M.** (2014). Traffic congestion's economic impacts: Evidence from US metropolitan regions. *Urban Studies*, 51, 10, 2088–2110.
- Tomer E., Safonov L., Havlin S.** (2000). Presence of many stable nonhomogeneous states in an inertial car-following model. *Physical Review Letters*, 84, 2, 382–385.
- Treiber M., Hennecke A., Helbing D.** (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 62, 1805–1824.
- Weik N.** (2022). Macroscopic traffic flow in railway systems — a discussion of the applicability of fundamental diagrams. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 23 (5). DOI: 10.1016/j.jrtpm.2022.100330
- Wilson A.G.** (1971). A family of spatial interaction models and associated developments. *Environment and Planning A*, 3, 255–282.
- Zieger S., Weik N., Niesen N.** (2018). The influence of buffer time distributions in delay propagation modelling of railway networks. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 8, 3–4, 220–232.

## Dynamic and agent-based models of intelligent transportation systems

© 2024 L.A. Beklaryan, G.L. Beklaryan, A.S. Akopov, N.K. Khachatryan

### L.A. Beklaryan,

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia;  
e-mail: beklar@cemi.rssi.ru

### G.L. Beklaryan,

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia;  
e-mail: glbeklaryan@gmail.com

### A.S. Akopov,

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia;  
e-mail: akopovas@umail.ru

### N.K. Khachatryan,

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia;  
e-mail: nerses-khachatryan@yandex.ru

Received 04.07.2023

**Abstract.** The authors present mathematical and simulation models of intelligent transportation systems (ITS). The models of two types are considered: the dynamic model of cargo transportation and agent-based model of the ITS — the ‘Manhattan grid’ type. The problem of rational railway planning related to research of cargo transportation models and corresponding cargo flows within the dynamic system is studied. The process of cargo transportation was modelled considering the mechanism of interactions with major railway infrastructure elements. The variation ranges of parameters at which cargo transportation system can be consistently active are defined. Possibilities of simulation modelling transportation and pedestrian flows at the micro-level considering complex interactions between heterogeneous agents, in particular, vehicles-to-pedestrians (V2P), vehicles-to-vehicles (V2V), vehicles-to-infrastructure elements (traffic lights) (V2I) etc. using the case study as the ITS belonging to the ‘Manhattan grid’ type studied. As a result, it is shown that ITS with partially controlled pedestrian crossings have advantage by the level of the total traffic in comparison to the ITS with uncontrolled crossings, especially with low-intensity and high-speed traffic. The two types of models are united by the unity of their tool-making description. For models of the first type, all processes at the micro-level are strictly regulated. Therefore, such systems are well characterized by established macro-indicators — states of the soliton solutions class (i.e. the solutions of travelling wave type). In models of the second type, there are large fluctuations at the micro-level that affect the safety of road users (e.g., traffic jams, accidents, etc.). This explains the use of agent-based models that consider processes at the micro-level. At the same time, macro-indicators are the most important characteristics for checking the adequacy of agent-based models.

**Keywords:** intelligent transportation systems, cargo transportation models, ‘Manhattan grid’, agent-based modelling of transportation systems, traffic simulation, dynamic transportation systems, management of railway transport, ‘smart’ traffic lights.

**JEL Classification:** C53, C63, R40, R41.

**UDC:** 519.876.5, 656.073.7, 656.11.

For reference: **Beklaryan L.A., Beklaryan G.L., Akopov A.S., Khachatryan N.K.** (2024). Dynamic and agent-based models of intelligent transportation systems. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 2, 105–122. DOI: 10.31857/S0424738824020091 (in Russian).