

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Хачатрян Нерсес Карленович**

**Моделирование процесса организации железнодорожных  
грузоперевозок**

Специальность 5.2.2. Математические, статистические и инструментальные  
методы в экономике

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора экономических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена в Лаборатории динамических моделей экономики и оптимизации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Центрального экономико-математического института Российской академии наук

**Научный консультант**

*Бекларян Лева Андреевич – доктор физико-математических наук, профессор*

**Официальные  
оппоненты**

*Гайнанов Дамир Ахнафович – доктор экономических наук, профессор, Институт социально-экономических исследований – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, научный руководитель*

*Гатауллин Тимур Малютович – доктор экономических наук, профессор*

*Резер Алексей Владимирович – доктор экономических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», кафедра «Финансы и кредит», профессор*

Защита диссертации состоится «31» октября 2024 г. в 16 часов 15 минут на заседании диссертационного совета МГУ.052.5 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 46, экономический факультет, ауд. П-4.

E-mail: msu.08.06@list.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3084>

Автореферат разослан «\_\_» июля 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат экономических наук

Е. А. Туманова

# **I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

## **Актуальность темы исследования**

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 экономики государства, а его развитие является важнейшим условием модернизации экономики. Кроме того, транспорт помогает развитию международных экономических отношений, освоению новых экономических районов, обеспечению обороноспособности страны.

Приведем оценку текущей ситуации транспортного комплекса РФ, представленную в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р (Транспортная стратегия Российской Федерации... , 2021). Согласно данному документу: «В среднем в 2014 - 2019 годах доля транспорта в валовом внутреннем продукте Российской Федерации составляла 6.2 %, что соответствует высокому уровню вклада в валовый внутренний продукт в общемировой практике. Прямой экономический эффект транспортной отрасли в 2019 году оценивается следующим образом (по видам экономической деятельности, относящимся к ведению федерального органа исполнительной власти, осуществляющего функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере транспорта): экспорт услуг транспортным комплексом – 1.2 трлн. рублей; вклад в валовый внутренний продукт – 6.7 трлн. рублей; обеспечение занятости в транспортном секторе – 4.5 млн. рабочих мест. Косвенный и индуцированный экономический эффект для российской экономики оценивается более чем в 18 трлн. рублей в виде увеличения объема валового внутреннего продукта и более 14 млн. рабочих мест. Размер основных фондов транспортного комплекса в 2019 году составлял 22118 млрд. рублей, или 16.8 % совокупных основных фондов Российской Федерации».

Согласно прогнозу, приведенному в указанной Транспортной стратегии: «Предполагается рост объемов перевозок грузов в 2035 году всеми видами транспорта на 17 процентов к уровню 2019 года. Одновременно с ростом объемов перевозок грузов

прогнозируется и изменение структуры перевозок по видам транспорта: объемы перевозок грузов железнодорожным транспортом увеличатся более чем на 39 процентов, при этом доля в объемах грузовых перевозок увеличится с 19 процентов в 2019 году до 21 процента в 2035 году».

Как показывает мировая практика, дальнейшее развитие транспортных систем в области грузовых перевозок во многом будет зависеть от результатов проведения следующих мероприятий: повышение эффективности грузовых перевозок за счет внедрения новых технологических решений, развитие международных транспортных коридоров, а также совершенствование мультимодальных перевозок.

Для такой географически протяженной страны как Россия особую роль играет железнодорожный транспорт. Он обеспечивает надежную и экономичную доставку грузов особенно в тех случаях, когда требуется быстрая доставка больших объемов грузов. Развитие железнодорожной сети и создание новых маршрутов способствует развитию экономики регионов и повышению уровня жизни населения. Кроме того, железнодорожный транспорт является одним из наиболее экологически чистых видов транспорта, а развитие железнодорожной сети может способствовать сокращению использования автотранспорта и, как следствие, снижению выбросов вредных веществ в атмосферу. В связи с этим железнодорожное планирование является актуальным и необходимым процессом для обеспечения устойчивого развития экономики, социальной инфраструктуры и экологии страны.

Важную роль в железнодорожном планировании играют математические методы и модели. Объясняется это следующими причинами:

1. *Сложность и масштабность железнодорожных систем.* Железнодорожные системы являются сложными и масштабными, что затрудняет процессы управления и планирования. В железнодорожном планировании необходимо учитывать множество факторов, таких как грузовые потоки, транспортные средства, маршруты, расписание, стоимость перевозок и другие. Математические методы и модели позволяют учитывать все эти факторы и их взаимодействие для нахождения наиболее оптимальных решений.
2. *Повышение конкурентоспособности.* В условиях жесткой конкуренции на рынке грузоперевозок железнодорожные компании вынуждены улучшать свои процессы и повышать эффективность перевозок. Математические методы и

модели помогают сократить издержки и повысить качество услуг, что способствует повышению конкурентоспособности компаний.

3. *Развитие технологий и новых подходов.* Развитие информационных технологий и новых подходов к управлению железнодорожной логистикой требует применения современных математических методов и моделей. Например, использование методов машинного обучения и искусственного интеллекта позволяет автоматизировать процессы планирования и управления железнодорожной инфраструктурой, а также сократить вероятность ошибок в принятии решений.
4. *Мониторинг и анализ данных.* Важной задачей в железнодорожном планировании является мониторинг и анализ данных о грузоперевозках и работе железнодорожной инфраструктуры. Математические методы и модели позволяют проводить анализ данных и прогнозировать различные сценарии развития ситуации для принятия наиболее эффективных решений.

Таким образом, математические методы и модели позволяют повысить эффективность перевозок, снизить издержки и улучшить качество услуг, что способствует развитию железнодорожной логистики в целом.

Математические методы и модели широко применяются при решении следующих задач на железнодорожном транспорте: а) определение оптимальной структуры железнодорожной сети, включая маршруты, станции и узлы; б) определение оптимальных маршрутов и расписаний железнодорожных перевозок; в) определение оптимального использования ресурсов железнодорожной компании и транспортных операторов, таких как вагоны, локомотивы и персонал.

Однако малоизученной остается такая важная проблема как исследование режимов железнодорожных грузоперевозок и соответствующих им грузопотоков в рамках динамической системы, описывающей процесс грузоперевозок в виде взаимодействия основных элементов железнодорожной инфраструктуры, в первую очередь станций. Разработка такой динамической системы позволит исследовать возникающие в железнодорожной сети грузопотоки, учитывая такие факторы, как технические возможности станций, характер спроса на грузоперевозки и конфигурацию железнодорожной сети.

## Степень разработанности проблемы

Можно выделить две большие группы математических моделей транспортных систем:

- модели транспортных сетей и их загрузки;
- модели динамики транспортных потоков.

Первая группа представлена моделями расчета корреспонденций, такими как гравитационная модель (Gerald, 1956; Wilson, 1971), энтропийная модель (Wilson, 1970; Harris, Wilson, 1978; Popkov, 1995), модели семейства конкурирующих центров (Fotheringham, 1983, 1986), а также моделями распределения потоков по сети (Shvetsov, 2009; Leventhal, Nemhauser, Trotter, 1973; Lo, Chen, 2000; Bar-Gera, 2002; Spiess, Florian, 1989).

Вторая группа представлена основными классами динамических моделей: макроскопическими (гидродинамическими), кинетическими (газодинамическими) и микроскопическими. Макроскопические модели (Gazis, 1974; Daganzo, 1994, 1995; Kerner, 2009; Гасников и др., 2013; Сухинова и др., 2009; Иносэ, Хамада, 1983), описывающие усредненные характеристики транспортного потока, также называют гидродинамическими, потому что в них сам поток уподобляется движению сжимаемой жидкости. Макроскопические диаграммы, отображающие взаимосвязь между параметрами производительности, такими как 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 явно описывают движение каждого транспортного средства. Они точнее макроскопических моделей описывают движение на отдельных участках транспортной сети, однако требуют гораздо больших вычислительных мощностей при практической реализации. Первые микроскопические модели были предложены в 50-х годах прошлого столетия (Pipes, 1953; Швецов, 2003). Примерами таких моделей являются модели следования за лидером (Gazis et al., 1961; Brackstone, McDonald, 1999), модели оптимальной скорости (Bando et al., 1994, 1995, 1998; Newell, 1961; Tomer et al., 2000), модель 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 эффектов взаимодействия индивидуальных транспортных средств (Prigogine, Herman, 1971; Lampis, 1978; Helbing, 1996; Helbing, Treiber, 1998; Nelson, 1995).

Перейдем к классификации математических моделей, применяемых для анализа транспортных сетей, основываясь на их функциональной роли, т.е. к группировке в зависимости от задач, для решения которых они предназначены. Такая группировка приводит к трем основным классам моделей: прогнозным, имитационным и оптимизационным (Швецов, 2003).

Прогнозные модели предназначены для оценки транспортных потоков в сети в предположении, что известны как конфигурация транспортной сети, так и ее характеристики. Такие модели позволяют прогнозировать ряд усредненных характеристик движения: объемы межрайонных корреспонденций, распределение транспортных средств по тем или иным участкам транспортной сети, интенсивность потоков и т.д. Одна из основных целей построения прогнозных моделей – оценить последствия от изменений в транспортной сети и размещения в ней новых объектов.

Имитационные модели предназначены для подробного описания процесса дорожного движения вплоть до воспроизведения всех его деталей. Исходными данными для таких моделей являются усредненные значения потоков и их распределение по отдельным участкам транспортной сети. Эти модели позволяют оценить такие важные характеристики процесса дорожного движения как задержки на перекрестках, неравномерность транспортных потоков во времени, протяженности дорожных заторов и динамики их образования и т.п. Применение имитационных моделей целесообразно при разработке проектов организации дорожного движения, оптимизации светофорных циклов регулирования и т.п. (Якимов, 2013). Примером такой модели является разработанная в ЦЭМИ РАН в 2009 году агент-ориентированная модель автомобильных пробок Москвы (Макаров, Житков, Бахтизин, 2009), позволяющая решать задачи масштаба городской агломерации, связанные с оценкой работы всей транспортной системы в результате изменения следующих ее элементов: введение новых радиальных или кольцевых

автомагистралей; временное закрытие или ликвидация какого-либо элемента транспортной системы; введение экономических санкций (плата за проезд по магистрали, за въезд в зону центра и т. п.).

Еще один большой класс моделей предназначен для оптимизации деятельности транспортных сетей. Такие модели позволяют определять оптимальные маршруты перевозок, формировать оптимальные конфигурации сети и т.д. (Lu, Wang, 2022; Veluscek et al., 2015; Стенбринк, 1981; Галабурда, 1985; Авен, Ловецкий, Моисеенко, 1985; Васильева, Игудин, Лившиц, 1987; Leventhal, Nemhauser, Trotter, 1973).

Как было отмечено выше, одним из наиболее востребованных для грузоперевозок видов транспорта в России является железнодорожный. Публикации, посвященные железнодорожной логистике, по типу исследуемых задач можно разбить на три основные группы. Первая группа представлена задачами проектирования инфраструктуры железнодорожной сети (Pyrgidis, 2016; Higgins, Ferreira, Kozan, 1995; Kraay, Barker, Chen, 1991; Ferreira, Murray, 1997; LeBlanc, 1976). Во вторую группу вошли задачи управления парком локомотивов и вагонов (Fügenschuh et al., 2008; Ahuja et al., 2005; Forbes, Holt, Watts, 1991; Beaujon, Turnquist, 1991; Sherali, Suharko, 1998; Sherali, Tuncbilek, 1997; Ziarati et al., 1997). В зависимости от особенностей регулирования и рынка, для каждого конкретного региона могут быть построены свои модели, учитывающие ту или иную специфику. В качестве примера можно рассмотреть работу Р. Фукасава и др. (Fukasawa et al., 2002), в которой представлена модель, применяемая одним из крупнейших железнодорожных транспортных операторов на территории Латинской Америки. Другим примером является работа А. Чезелли и др. (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 некоторых работах представлены модели минимизации издержек транспортировки грузов по железнодорожной сети, покрывающей 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 и организации грузовых потоков (Лазарев и др., 2012; Brannlund et al., 1998; Cai, Goh, 1994; Cai, Goh, Mees, 1998; Carey, Lockwood, 1995; Higgins, Kozan, Ferreira, 1996; Jovanovic, Barker, 1991; Kraay, Barker, Chen, 1991; Sahin, 1999; Sauder, Westerman, 1983; Szpigel, 1973).

В последние годы третью группу стали дополнять исследования, посвященные применению макроскопической теории трафика для описания процессов, происходящих на железнодорожном транспорте. В работе Н. Вейка (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, которые позволяют 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 внешними факторами, такими 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 Деккера и др. (Dekker et al., 2022) задержки фигурируют как переменные, связанные не с поездами, а 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

общих (или даже системных) величинах, таких как топология сети и расписание. Авторы исследования проводят аналогию с гидродинамикой: тогда как традиционно задержки рассматриваются как лагранжевы частицы (то есть следуют за поездами, как жидкость, переносящая частицы), авторы предлагают рассматривать их с эйлеровой точки зрения (то есть 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), а вся информация модели встроена в одну матрицу, что облегчает анализ свойств системы.

Одним из основных показателей эффективности работы железнодорожного транспорта являются скорости движения грузовых поездов, которые весьма чувствительны к уровню загрузки железнодорожной инфраструктуры и обратно пропорциональны себестоимости железнодорожных перевозок. Основными причинами чрезмерной загрузки железнодорожной инфраструктуры являются сезонные колебания в отправке грузов и неравномерность накопления грузовых составов на технических и грузовых станциях. В последнее время к указанным выше причинам можно также добавить геополитические изменения, влияющие на мировую логистику (переориентация грузопотоков) и приводящие к чрезмерной загрузке одних направлений и недогрузке других.

Оценка влияния неравномерности загрузки железнодорожной инфраструктуры на уровень скоростей в грузовом движении нашла отражение в трудах ряда исследователей (Мачарет, Разуваев, Ледней, 2022; Мачарет, Разуваев, Ледней, 2020).

Однако, малоизученным остается такое направление в железнодорожном планировании, как разработка подходов и методов организации грузоперевозок, которые позволят снизить неравномерность железнодорожного грузопотока и тем самым увеличить скорости движения поездов. Это важно не только для железнодорожной отрасли, но также для экономики предприятий и отраслей, которые обслуживаются железными дорогами.

## Цель и задачи исследования

**Целью диссертационного исследования** является разработка принципов, методов и моделей управления железнодорожными грузоперевозками для эффективного и устойчивого функционирования как железнодорожной отрасли, так и связанных с ней отраслей экономики в условиях роста неопределенности в мировой логистике.

**Задачи исследования.** Для достижения цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать основополагающие принципы управления железнодорожными грузоперевозками в режиме реального времени, направленные на снижение риска чрезмерной загрузки железнодорожной инфраструктуры, в условиях гибкости логистических цепочек поставок и переориентации грузопотоков.

2. Разработать методологию построения динамических моделей, описывающих процесс организации грузоперевозок в режиме реального времени для основных конфигураций железнодорожной сети, в условиях спроса разной интенсивности.

3. Построить динамические модели, описывающие процесс организации грузоперевозок в режиме реального времени, направленные на оптимальное функционирование железнодорожной инфраструктуры в условиях спроса разной интенсивности.

4. Выработать рекомендации, основанные на результатах апробации моделей, которые позволят: а) существенно уменьшить риск чрезмерной загрузки железнодорожной инфраструктуры в условиях повышенного спроса на грузоперевозки на отдельных направлениях железных дорог; б) установить грузопоток близкий к равномерному на незагруженных участках железнодорожной сети.

5. Разработать подход к решению задачи управления парком грузовых железнодорожных вагонов, основанный на использовании сети всевозможных маршрутов отправки грузов от станций отправления к станциям назначения. Построить алгоритм, формализующий данный подход в виде классической оптимизационной задачи.

**Объект исследования.** Процессы взаимодействия элементов экономической инфраструктуры.

**Предмет исследования.** Обеспечение эффективного и устойчивого функционирования экономической инфраструктуры в условиях неопределенности внешней среды.

**Научная новизна.** Основные положения научной новизны состоят в следующем:

1. Разработаны принципы управления железнодорожными грузоперевозками в режиме реального времени направленные на снижение риска чрезмерной загрузки станций в условиях гибких логистических цепочек поставок и переориентации грузопотоков. Они основаны на взаимодействии соседних станций с учетом их актуальной загрузки и характера спроса на грузоперевозки.

2. Разработана методология построения моделей, описывающих железнодорожные грузоперевозки в режиме реального времени, основанная на взаимодействии соседних станций. Она предполагает два разных подхода к организации взаимодействия станций. Первый подход определяет такие правила взаимодействия соседних станций, которые позволяют использовать технические возможности станций в полном объеме. Второй подход определяет правила синхронизации входных и выходных потоков на станциях. В отличие от известных моделей, которые применяют принцип моделирования в реальном времени как правило в рамках перепланирования расписания в ответ на технические сбои, аварии, изменения в спросе или другие непредвиденные обстоятельства, предлагаемая методология представляет собой комплексное многоаспектное решение проблемы устойчивого функционирования железнодорожной отрасли и связанных с ней отраслей экономики и является основой для полной автоматизации процесса грузоперевозок.

3. Построены динамические модели организации грузоперевозок на железнодорожном транспорте в случае стабильно высокого спроса на них. Они основаны на конечно-разностном аналоге нелинейного параболического уравнения. В этих моделях грузопоток разделен на две составляющие: конвективную и диффузионную. Конвективная составляющая описывает движение грузов с учетом загруженности станций. Диффузионная составляющая определяет распределение грузов между соседними станциями, что позволяет сглаживать грузопоток.

4. Построены динамические модели организации грузоперевозок на железнодорожном транспорте в случае отсутствия стабильно высокого спроса на них. Они основаны на синхронизации входных и выходных потоков на станциях, которая осуществляется посредством управления параметрами моделей, характеризующими степень использования технического потенциала станций.

5. Предложен новый подход к решению задачи управления парком грузовых железнодорожных вагонов. Преимуществом этого подхода, заключающегося в решении задачи линейного программирования большой размерности, является поиск оптимального плана перевозок на множестве всевозможных маршрутов, тогда как в известных методах, связанных с генерацией колонок, решается серия задач линейного программирования на подмножествах множества всех маршрутов, что может привести к решению отличному от оптимального.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

**Теоретическая значимость** работы обусловлена разработкой нового подхода в описании процесса грузовых железнодорожных перевозок, основанного на его представлении в виде динамических моделей, описывающих процесс взаимодействия произвольной станции с соседними станциями. Результатом этого взаимодействия является формирование грузопотока в рамках спроса на грузоперевозки и технического потенциала станций. Разработанный подход и представленные в диссертации модели являются достаточно универсальными и могут быть использованы при описании широкого круга задач как в экономике, так и в других областях. Например, они могут быть применены для анализа поведения потребителей, управления запасами, планирования маркетинговых кампаний. В сфере экологии они могут использоваться для анализа воздействия различных процессов на окружающую среду и разработки экологически устойчивых стратегий. В информационных технологиях методология может быть применена для управления информационными потоками и повышения эффективности информационных систем. В области здравоохранения модели могут использоваться для планирования и управления медицинскими ресурсами, а также работой медицинских учреждений.

**Практическая значимость** работы обусловлена большой потребностью в построении моделей, позволяющих совершенствовать процесс организации

грузоперевозок. Построенную модель, в частности, можно использовать для оценки эффекта в виде увеличения величины грузопотока, проходящего через исследуемый участок железнодорожной сети, в зависимости от мероприятий, направленных на развитие его инфраструктуры.

**Методы исследования.** В работе используются методы теории дифференциальных уравнений, системной динамики, алгебры матриц, методы численного решения систем дифференциальных уравнений.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная методология построения моделей железнодорожных грузоперевозок определяет правила взаимодействия соседних станций, которые обеспечивают оптимальное распределение грузов между станциями, позволяют достичь более равномерного использования ресурсов и предотвратить перегрузки на станциях. Эти правила дают возможность управлять грузопотоками, улучшая использование доступных ресурсов и повышая общую пропускную способность системы грузоперевозок.

2. Построенные модели, предполагающие выделение конвективной и диффузионной составляющих грузопотока, делают возможным осуществлять бесперебойный грузопоток высокой интенсивности. Это достигается за счет максимального использования инфраструктуры всех станций. Такие модели могут служить инструментом для прогнозирования динамики грузопотока в условиях стабильно высокого спроса на грузоперевозки.

3. Сформированные модели, синхронизирующие входные и выходные потоки на станциях, обеспечивают более эффективную организацию грузоперевозок, минимизируют задержки и осуществляют плавный грузопоток. Они могут служить инструментом для прогнозирования динамики грузопотока в случае переменного спроса на грузоперевозки.

4. Предложенный подход к решению задачи управления парком грузовых железнодорожных вагонов позволяет осуществлять поиск оптимального плана перевозок на множестве всевозможных маршрутов, что увеличивает точность полученного решения.

## **Соответствие содержания диссертации паспорту научной специальности, по которой защищается диссертация**

Диссертационное исследование соответствует следующим направлениям исследований паспорта научной специальности 5.2.2. «Математические, статистические и инструментальные методы в экономике»:

2. Типы и виды экономико-математических и эконометрических моделей, методология их использования для анализа экономических процессов, объектов и систем.
3. Разработка и развитие математических и эконометрических моделей анализа экономических процессов (в т.ч. в исторической перспективе) и их прогнозирования.

### **Апробация результатов**

Основные положения диссертационного исследования были представлены на международных и всероссийских научных конференциях, наиболее значимые из которых следующие:

1. Ломоносовские чтения. Секция экономических наук на тему «Человеческий и социальный капитал России: новые вызовы и возможности» (Москва, 2024).
2. XXV Всероссийский симпозиум «Стратегическое планирование и развитие предприятий» (Москва, 2024).
3. Научная конференция «Академическая экономическая наука о проблемах социально-экономического развития России: история и современность» к 300-летию Российской академии наук (Москва, 2024).
4. Международная научно-практическая конференция «Развитие производительных сил Кузбасса: история, современный опыт, стратегия будущего» (Кемерово, 2023).
5. IV Международная конференция «Искусственные общества и информационные технологии» и круглый стол «Суперкомпьютерные технологии и искусственные общества» (Москва, 2022).
6. Международная научная конференция по моделированию и анализу комплексных систем и процессов (MACSPRO'2021).
7. Международная научная школа-семинар имени академика С.С. Шаталина «Системное моделирование социально-экономических процессов» (Москва, 2021).

8. III Международная конференция «Искусственные общества и информационные технологии» и круглый стол «Суперкомпьютерные технологии и искусственные общества» (Москва, 2021).
9. XXII Апрельская международная научная конференция по проблемам развития экономики и общества (Москва, 2021).
10. Международная научная школа-семинар имени академика С.С. Шаталина «Системное моделирование социально-экономических процессов» (Москва, 2020).
11. XIII Всероссийская с международным участием школа-симпозиум «Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем» (АМУР-2019).
12. IX Московская Международная конференция по исследованию операций (ORM2018-Germeyer100).
13. Научная конференция, посвященная 55-летию ЦЭМИ РАН (Москва, 2018).
14. XXVIII Крымская Осенняя Математическая Школа-симпозиум по спектральным и эволюционным задачам (КРОМШ-2017).
15. 17-я Всероссийская конференция «Математические методы распознавания образов» (Светлогорск, 2015).
16. X Международная научная конференция «Применение многомерного статистического анализа в экономике и оценке качества» (Москва, 2014).
17. Воронежская весенняя математическая школа «Понтрягинские чтения – XXIII» (Воронеж, 2012).
18. XXIII Крымская Осенняя Математическая Школа-симпозиум по спектральным и эволюционным задачам (КРОМШ-2012).
19. 53-я научная конференция МФТИ (Долгопрудный, 2010).
20. Международная научная школа-семинар имени академика С.С. Шаталина «Системное моделирование социально-экономических процессов» (Воронеж, 2009).

**Основное содержание работы** отражено в 26 научных трудах, из них: одна монография (объем – 10.5 п.л.); 18 публикаций в изданиях, соответствующих п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном

университете имени М.В. Ломоносова (объем – 12.95 п.л., личный вклад автора – 9.35 п.л.) и 7 публикаций в других изданиях (объем – 6.32 п.л., личный вклад автора – 4.97 п.л.).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 163 наименования и трех приложений. Диссертация изложена на 272 страницах, содержит 112 рисунков и 11 таблиц.

## **II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

*1. Разработанная методология построения моделей железнодорожных грузоперевозок определяет правила взаимодействия соседних станций, которые обеспечивают оптимальное распределение грузов между станциями, позволяют достичь более равномерного использования ресурсов и предотвратить перегрузки на станциях. Эти правила дают возможность управлять грузопотоками, улучшая использование доступных ресурсов и повышая общую пропускную способность системы грузоперевозок.*

Традиционная парадигма централизованного управления железнодорожным участком основана на идее обеспечения движения всех типов поездов согласно строгому графику, в котором определены нормативы времен выполнения операций как при движении, так и при остановках на станциях. Основным приоритетом является увеличение "твердого" ядра графика для грузовых поездов и повышение их скорости. Этот подход не учитывает возможности изменения стратегии управления в условиях изменения интенсивности движения поездов или состояния инфраструктуры. В случае отклонений от графика строгое следование нормативам, в конечном итоге, приводит к увеличению общего уровня задержек и избыточному расходу ресурсов.

Прогрессивный подход к решению проблемы предполагает, что временные характеристики технических процессов в грузовом сегменте железнодорожного движения должны быть гибкими и зависеть от текущей ситуации. Одним из ключевых аспектов этого подхода является управление интенсивностью грузопотока в зависимости от загруженности станций. Эта функциональность позволяет системе

грузоперевозок регулировать скорость движения поездов, оптимизируя интенсивность грузоперевозок в соответствии с актуальной ситуацией. Такой подход способствует более эффективному использованию железнодорожной инфраструктуры и обеспечивает более плавное движение поездов, особенно на участках с высокой загруженностью. Динамическое управления грузопотоком способствует снижению заторов, оптимизирует процессы движения поездов и повышает общую эффективность железнодорожных перевозок.

В данной диссертационной работе представлены макроскопические динамические модели, в которых процесс организации железнодорожных грузоперевозок представляет собой формирование грузопотока на основе взаимодействия произвольной станции с соседними станциями (предыдущей и следующей). Такое взаимодействие нацелено на снижение неравномерности загрузки инфраструктуры. Рассматривается несколько конфигураций участка железнодорожной сети. Первая конфигурация представляет собой протяженную линию, состоящую из большого количества станций и подходит для описания транснациональных перевозок (например, перевозки по транссибирской железнодорожной магистрали протяженностью более 9000 км). Вторая конфигурация – замкнутая цепочка станций, третья – железнодорожная линия между двумя узловыми станциями.

В зависимости от характера спроса используется два подхода к организации грузоперевозок. Первый подход целесообразно применять при наличии стабильно высокого спроса на грузоперевозки. В этом случае важно максимально задействовать потенциал всех станций. Для этого необходимо обеспечить загрузку определенного количества путей на станциях, которое представляет собой максимально возможное число задействованных путей на станциях, при котором гарантированно можно организовать бесперебойный грузопоток (загрузка 70-80 % пропускной способности станции). Для исключения ситуаций, приводящих к сбою в системе грузоперевозок, при загрузке станций сверх указанного уровня необходимо часть грузов отправить на временное хранение. Для этого предполагается наличие специальных зон хранения между станциями. Для данного подхода одной из важных задач является организация системы контроля, обеспечивающей вывод грузов из зон временного хранения. Процедура организации грузопотока использует две технологии, единые для всех

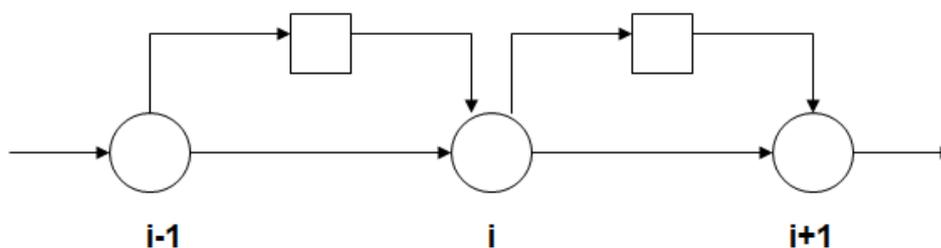
станций, а сам грузопоток состоит из двух составляющих: диффузионной и конвективной.

Диффузионная составляющая является результатом взаимодействия соседних станций, которое формируется по определенному правилу. Согласно этому правилу каждая станция должна принимать груз с предыдущей станции, если число задействованных путей на ней меньше, чем на предыдущей станции, и отправлять на следующую станцию, если число задействованных путей на ней больше, чем на следующей станции. При этом интенсивность приема и интенсивность отправки грузов пропорциональны разности чисел задействованных путей на соседних станциях. Основной задачей такого взаимодействия станций является уменьшение неравномерности грузопотока на рассматриваемом участке железнодорожной сети. Конвективная составляющая грузопотока является результатом взаимодействия станции с соседними зонами временного хранения грузов. Такое взаимодействие нацелено на использование технических возможностей станции в полном объеме.

Второй подход целесообразно применять в случае, когда нет стабильно высокого спроса на грузоперевозки. В этом случае нет необходимости задействовать потенциал станций в полной мере и, соответственно, в использовании специальных зон между станциями для временного хранения части грузов. В такой ситуации добиться уменьшения неравномерности грузопотока можно с помощью правильного управления пропускными способностями станций в зависимости от спроса на грузоперевозки. Основной характеристикой станций является степень несогласованности между приемом и отправкой грузов, которая определяет дисбаланс между объемом входных и выходных грузов за единицу времени. Для обеспечения равномерного грузопотока важно в таком объеме задействовать потенциалы станций, чтобы степень несогласованности между приемом и отправкой грузов со временем имела небольшие значения на всех станциях.

*2. Построенные модели, предполагающие выделение конвективной и диффузионной составляющих грузопотока, делают возможным осуществлять бесперебойный грузопоток высокой интенсивности. Это достигается за счет максимального использования инфраструктуры всех станций. Такие модели могут служить инструментом для прогнозирования динамики грузопотока в условиях стабильно высокого спроса на грузоперевозки.*

Рассмотрим движение грузопотока в рамках первой конфигурации железнодорожной сети. Организация эффективного грузопотока в рамках данной конфигурации железнодорожной сети в случае стабильно высокого спроса на грузоперевозки во многом зависит от правильной организации процесса взаимодействия промежуточных станций. Поэтому, в данном случае узловые станции не присутствуют и их влияние на систему грузоперевозок не учитывается. Для того чтобы описать процедуру грузоперевозок без учета влияния на нее узловых станций будем считать линию железнодорожной сети неограниченной. Движение грузопотока осуществляется в одном направлении. Схема движения грузопотока представлена на рис.1. Кружками на ней обозначены станции, а квадратами – зоны временного хранения грузов.



**Рис.1.** Схема движения грузопотока

*Источник: составлено автором*

На каждой станции существует определенное число путей (так называемые станционные пути). Каждая станция с номером  $i$  в произвольный момент времени  $t$  характеризуется числом задействованных путей  $z_i(t)$ . Это число отождествляется с объемом грузов на станции. Опишем процесс организации грузоперевозок, определяющий формирование грузопотока, содержащего две составляющие: постоянный и переменный. Постоянный поток формируется автоматически, однако, его уровень может быть достаточно низким и как следствие не полностью удовлетворить высокий спрос на грузоперевозки. Простое увеличение постоянного потока до оптимальных значений невозможно в силу неравномерной загруженности станций. В связи с этим параллельно с постоянным потоком запускается переменный поток, с помощью которого можно увеличить грузопоток за счет выравнивания загруженности станций. Организация переменного потока осуществляется посредством двух технологий. Первая технология осуществляет взаимодействие

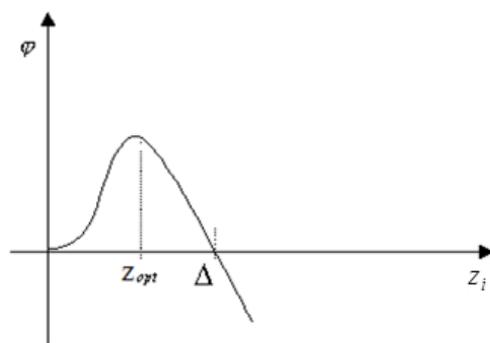
соседних станций, а вторая – взаимодействие станции с соседними зонами временного хранения грузов. Опишем эти технологии.

Согласно первой технологии, каждая станция  $i$  должна:

- 1) принять груз с предыдущей станции с интенсивностью  $\alpha(z_{i-1} - z_i)$ , если  $z_{i-1} > z_i$ ,
- 2) и отправить его на следующую станцию с интенсивностью  $\alpha(z_i - z_{i+1})$ , если  $z_i > z_{i+1}$ .

При нарушении первого условия станция с номером  $i$  отправляет груз в зону временного хранения с интенсивностью  $\alpha(z_i - z_{i-1})$ , а при нарушении второго – принимает груз с зоны временного хранения с интенсивностью  $\alpha(z_{i+1} - z_i)$ . Параметр  $\alpha > 0$  является нормативом правила взаимодействия соседних станций. Таким образом, произвольная станция принимает груз с предыдущей станции, если число задействованных путей на ней меньше чем на предыдущей станции и отправляет на следующую станцию, если число задействованных путей на ней больше чем на следующей станции. Интенсивность как приема, так и отправки грузов с произвольной станции пропорциональна разности чисел задействованных путей на данной станции и соседних станциях. Коэффициент пропорциональности является единым для всех станций и характеризует возможность перегонных путей в целом по всей железнодорожной сети.

Для всех станций существует единый критический уровень числа задействованных станционных путей, при превышении которого необходимо экстренное освобождение путей (отправка части грузов в зоны временного хранения). Экстренное освобождение путей проводится с помощью второй технологии. Ее используют также и для приема грузов с зоны временного хранения, расположенного до станции (если число задействованных путей на станции меньше критического уровня числа задействованных путей). График функции, задающей скорость изменения числа задействованных путей в рамках данной технологии, представлен на рис. 2.



**Рис. 2.** Скорость изменения числа задействованных станционных путей в рамках второй технологии

*Источник: составлено автором*

Как видно из рис. 2, до тех пор пока число задействованных путей на станции не больше критического значения  $\Delta$ , вторая технология применяется для приема грузов с зоны временного хранения, расположенного до станции. Так как данная технология является дорогостоящей, то применяется она активно лишь при определенной загрузке станций (близкой к  $z_{opt}$ ), при которой уменьшается грузопоток в рамках первой технологии, а загруженность станций не близка к критической. Как только число задействованных путей на станции превышает значение  $\Delta$ , то вторая технология 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 и следовательно вывоз грузов в зону временного хранения осуществляется с интенсивностью прямо пропорциональной превышению числа задействованных путей критического значения.

Организация подобных грузоперевозок с использованием зон временного хранения грузов должна включать в себя систему контроля. В данной модели используется простая система контроля. Она заключается в том, что объемы грузов на соседних станциях должны совпадать с единым лагом времени  $\tau > 0$ . В нашей интерпретации она формулируется следующим образом: число задействованных путей на соседних станциях должны совпадать с единым лагом времени  $\tau > 0$ .

Таким образом, динамика числа задействованных путей, определяемая описанными выше двумя технологиями, задается бесконечномерной системой дифференциальных уравнений

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

После простейшего преобразования данная система приобретает следующий вид

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

Система контроля задается следующими нелокальными линейными ограничениями

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

Параметр  $\tau$  называется характеристикой системы контроля.

Возникает вопрос, существуют ли режимы грузоперевозок, осуществляемые с помощью указанных выше технологий и удовлетворяющие заданной системе контроля. Если такие режимы существуют, то для какого диапазона изменения характеристики системы контроля. Дело в том, что диапазон изменения характеристики системы контроля  $\tau$  должен быть актуальным. Слишком малые значения  $\tau$  неактуальны, так как они значительно меньше времени перегона грузов со станции  $i$  на станцию  $i + 1$ . Слишком большие значения  $\tau$  также неактуальны, так как они не соизмеримы с временными лагами реальных процессов.

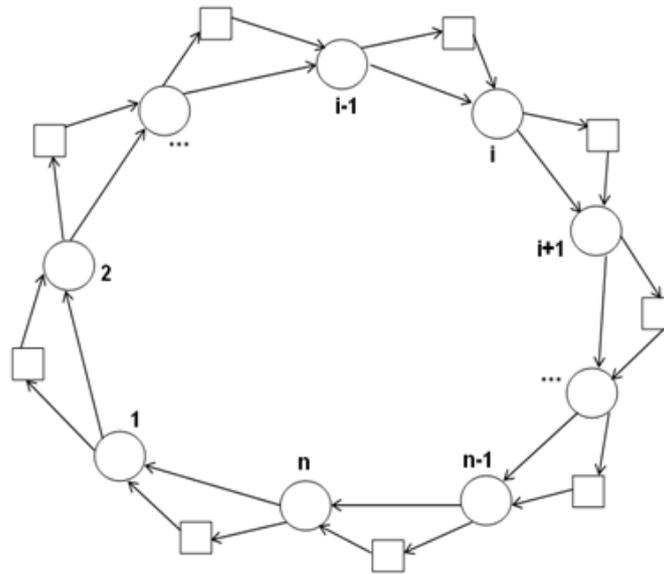
Доказано существование  $\bar{\tau} > 0$  такого, что для всякого  $\tau \in (0, \bar{\tau})$ ,  $\bar{i} \in Z$ ,  $\bar{z} \in R$ ,  $\bar{t} \in [0, +\infty)$  система (1)–(2) с фиксированным начальным значением  $z_{\bar{i}}(\bar{t}) = \bar{z}$  имеет решение. Такое решение является единственным.

Таким образом, существует такой диапазон изменения характеристик системы контроля, что для каждого значения характеристики системы контроля из этого диапазона и произвольной начальной загрузки станций имеется единственный режим грузоперевозок, осуществляемый с помощью указанных выше технологий и удовлетворяющий заданной системе контроля. Значение  $\bar{\tau} > 0$  зависит от параметра  $\alpha$  и константы Липшица  $\varphi(\cdot)$ , т.е. функции, отражающей возможности второй технологии по приему грузов с зон временного хранения.

Важно, чтобы существующие режимы грузоперевозок позволяли осуществлять бесперебойный грузопоток в условиях высокого спроса на грузоперевозки. Система (1)–(2) имеет стационарное решение  $\bar{z} \equiv \{\dots, \Delta, \Delta, \Delta, \dots\}$ , которое характеризует режим грузоперевозок, использующий инфраструктуру станций в полном объеме. Исследование системы (1)–(2) показало, стационарное решение  $\bar{z} \equiv \{\dots, \Delta, \Delta, \Delta, \dots\}$  системы (1)–(2), является устойчивым. Это означает, что режимы грузоперевозок, описывающие интенсивный грузопоток позволяют задействовать железнодорожную

инфраструктуру наилучшим образом и при этом обеспечивать бесперебойный грузопоток.

Перейдем к описанию модели организации грузоперевозок в случае стабильно высокого спроса на грузоперевозки в рамках второй конфигурации железнодорожной сети – замкнутой цепочки станций, изображенной на следующем рисунке



**Рис. 3.** Схема замкнутой цепочки станций

*Источник: составлено автором*

На рис. 3 представлена замкнутая цепочка состоящая из  $n$  станций (нумерованные кружки). Как и в случае транснациональных грузоперевозок между произвольными двумя соседними станциями расположена зона временного хранения грузов (квадраты), так что на произвольную станцию груз может поступать с предыдущей станции или из зоны временного хранения, расположенной до станции и отправляться на следующую станцию или в зону временного хранения грузов, расположенную после станции. Организация грузопотока осуществляется точно также, как и в предыдущей модели. Формально такую модель можно рассматривать как частный случай модели представленной выше и для ее исследования нам необходимо изучить решения системы (1)–(2), удовлетворяющие следующему дополнительному условию

$$z_i(t) = z_{i+n}(t), \quad i \in Z, \quad t \in [0, +\infty).$$

Однако для дальнейшего исследования ее удобнее представить в виде следующей конечномерной системы дифференциальных уравнений (3)–(5) с нелокальными линейными ограничениями (6)–(7).

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

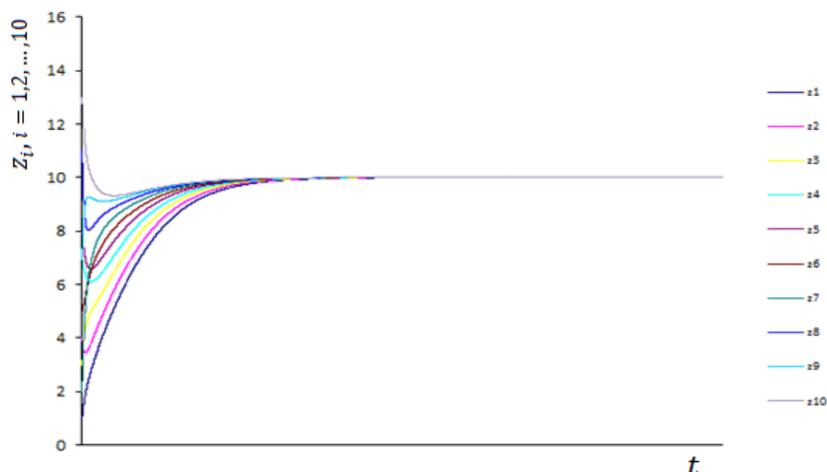
$$\dot{z}_i(t) = \alpha z_{i-1} - 2\alpha z_i + \alpha z_{i+1} + \varphi(z_i), \quad i = 2, \dots, n-1, \quad t \in [0, +\infty), \quad (4)$$

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

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

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

Процесс организации грузоперевозок в рамках данной конфигурации железнодорожной сети сводится к исследованию системы (3)–(7), которое показало, что стационарное решение  $(\Delta, \Delta, \dots, \Delta)$  является глобально устойчивым в пространстве всех решений системы (3)–(5). Таким образом, всякое решение системы дифференциальных уравнений (3)–(5) с неотрицательными координатами начального значения сходится к стационарному решению  $(\Delta, \Delta, \dots, \Delta)$  (рис. 4).



**Рис. 4.** Установление стационарного режима грузоперевозок

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

Это означает, что организация грузоперевозок по замкнутой цепочке станций в соответствии с описанными ранее технологиями всегда приводит к установлению максимально возможного стационарного грузопотока. Время установления такого режима зависит как от технических возможностей перегонных путей, так и от

интенсивности привлечения второй технологии для экстренного освобождения станций.

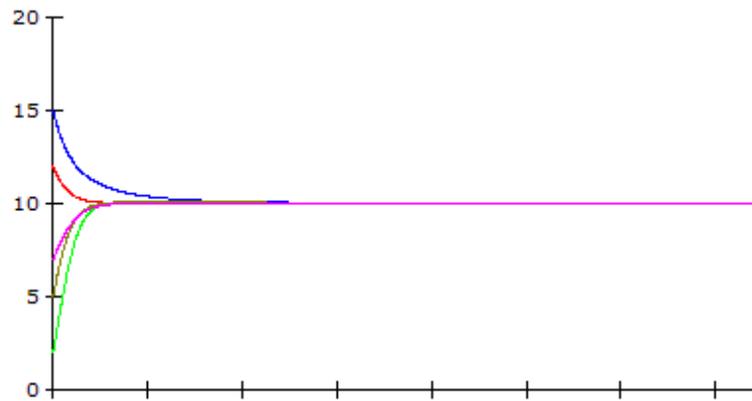
Отметим, что модели, представленные выше, строились в предположении, что емкости зон временного хранения грузов не ограничены. Далее представлена модификация модели организации грузоперевозок по замкнутой цепочке станций, учитывающая ограниченность указанных емкостей.

Напомним, что между произвольными промежуточными станциями предполагается наличие зоны для временного хранения грузов. Проведем их нумерацию. Зону хранения, расположенную между станциями с номерами  $i$  и  $i + 1$  обозначим номером  $i$ . Количество задействованных путей в  $i$ -ой зоне хранения в момент времени  $t$  обозначим через  $y_i(t)$ . Предположим, что количество путей во всех зонах хранения одинаково и равно  $V$ .

При такой модификации модели корректируются правила взаимодействия соседних станций. Такое взаимодействие должно учитывать ограниченность емкостей зон временного хранения грузов: при приеме грузов с них – снизу значением 0, а при отправке грузов в эти зоны – сверху значением  $V$ . В результате изменяются уравнения (3)–(5), описывающие динамику числа задействованных путей на станциях. Кроме того, появятся дополнительные уравнения, описывающие динамику числа задействованных путей в зонах временного хранения грузов, решения которых должны удовлетворять условию ограниченности емкостей этих зон. Опишем результаты, полученные при исследовании модифицированной модели, учитывающей ограниченность емкостей зон временного хранения грузов. Она имеет три типа стационарных режимов:

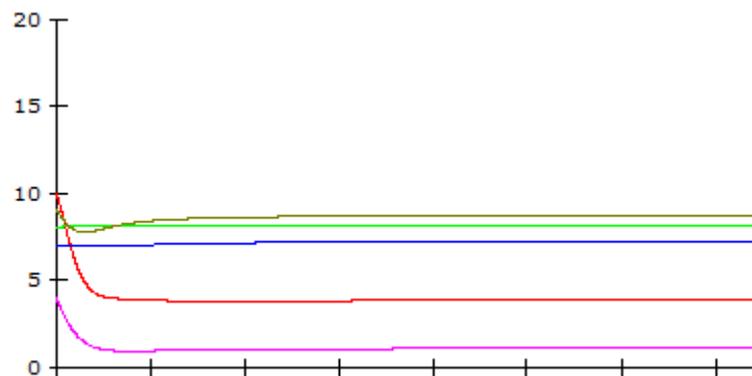
1.  $z_i = \Delta$ ,  $y_i = c_i$ ,  $0 \leq c_i \leq V$ ,  $i = 1, \dots, n$ ;
2.  $z_i = b$ ,  $b < \Delta$ ,  $y_i = 0$ ,  $i = 1, \dots, n$ ;
3.  $z_i = b$ ,  $b > \Delta$ ,  $y_i = V$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

При любой начальной загрузке станций и зон временного хранения грузов система грузоперевозок сходится к одному из трех указанных типов стационарных режимов. Например, на рис. 5 и рис. 6 показана сходимость к стационарному режиму первого типа.



**Рис. 5.** Динамика чисел задействованных путей на станциях. Сходимость к стационарному режиму первого типа

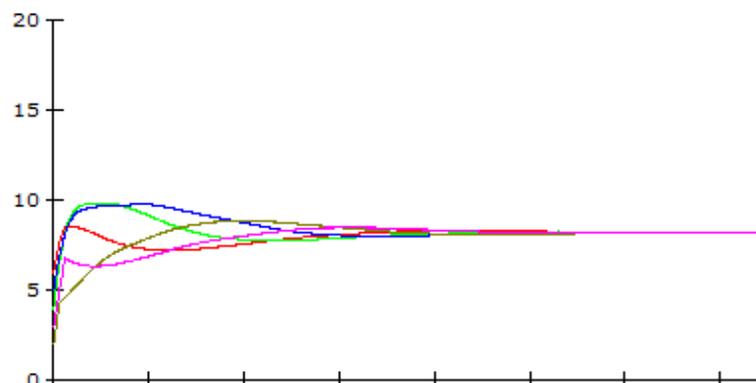
*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*



**Рис. 6.** Динамика чисел задействованных путей в зонах временного хранения грузов. Сходимость к стационарному решению первого типа

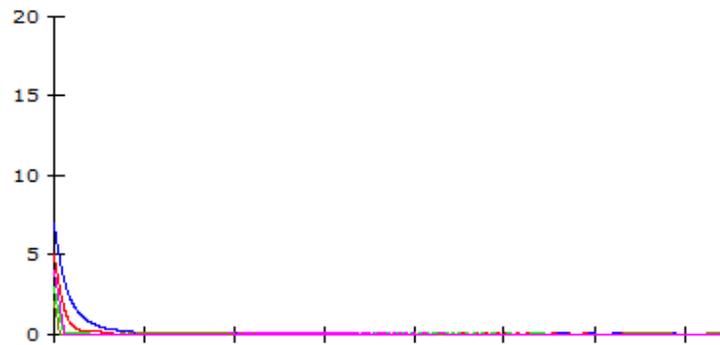
*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

На рис. 7 и рис. 8 показана сходимость к стационарному режиму второго типа.



**Рис. 7.** Динамика чисел задействованных путей на станциях. Сходимость к стационарному режиму второго типа

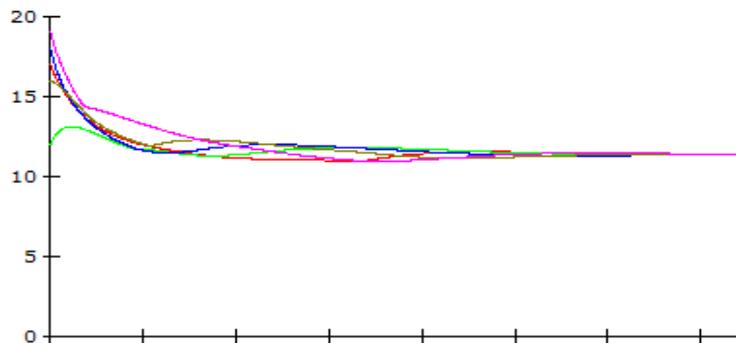
*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*



**Рис. 8.** Динамика чисел задействованных путей в зонах временного хранения грузов. Сходимость к стационарному режиму второго типа

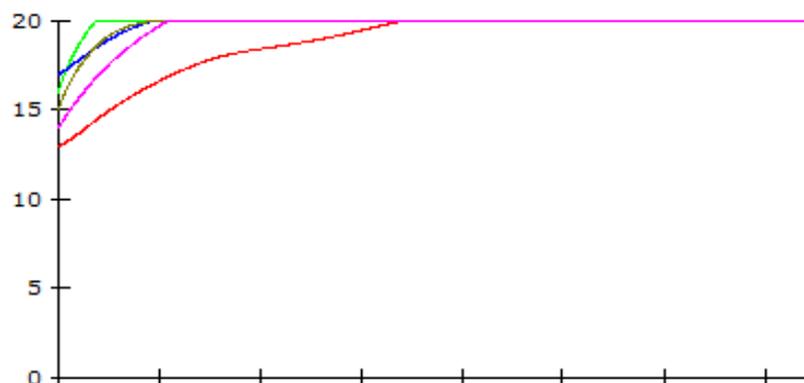
*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

На рис. 9 и рис. 10 показана сходимость к стационарному режиму третьего типа.



**Рис. 9.** Динамика чисел задействованных путей на станциях. Сходимость к стационарному решению третьего типа

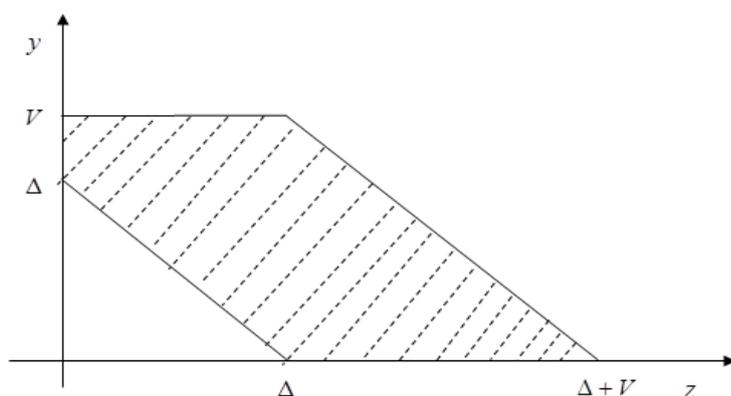
*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*



**Рис. 10.** Динамика чисел задействованных путей в зонах временного хранения грузов. Сходимость к стационарному режиму третьего типа

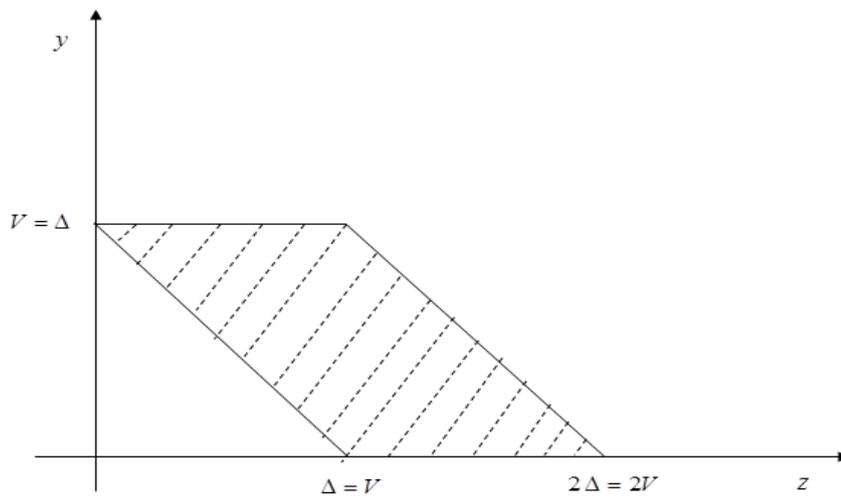
*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

Стационарные режимы исследованы на устойчивость. Здесь следует отметить, что понятие устойчивости применяется только к компонентам стационарного решения, описывающим числа задействованных путей на станциях. Как показали многочисленные эксперименты, стационарные режимы второго и третьего типов являются локально устойчивыми, а первого – глобально устойчивыми. С помощью численных экспериментов определена область притяжения стационарных режимов первого типа. В зависимости от взаимного расположения на числовой прямой точек  $\Delta$  и  $V$  получаются три вида областей устойчивости (рис. 11, рис. 12, рис. 13). По оси  $z$  откладывается среднее значение числа задействованных путей на станциях, а по оси  $y$  – среднее значение числа задействованных путей в зонах временного хранения грузов в начальный момент времени.



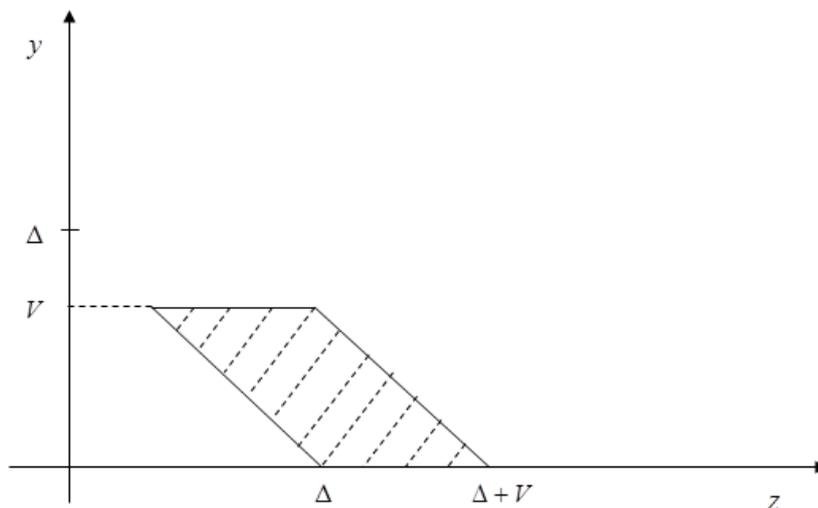
**Рис. 11.** Первый вид области притяжения ( $\Delta < V$ )

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*



**Рис. 12.** Второй вид области притяжения ( $\Delta = V$ )

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*



**Рис. 13.** Третий вид области притяжения ( $\Delta > V$ )

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

Вернемся к стационарным режимам. С экономической точки зрения наиболее оптимальным является первый режим. Во-первых, только он является глобально устойчивым. Во-вторых, в этом режиме наиболее эффективно используются возможности станций и при этом можно организовать бесперебойную работу системы грузоперевозок. Из рисунков 11, 12 и 13 следует, что система переходит в стационарный режим первого типа, если сумма средних значений чисел задействованных путей на станциях и чисел задействованных путей в зонах

временного хранения грузов в начальный момент времени не меньше  $\Delta$  и при этом не превышает значения  $\Delta + V$ . Если сумма средних значений чисел задействованных путей на станциях и чисел задействованных путей в зонах временного хранения грузов в начальный момент времени меньше  $\Delta$ , то система переходит в стационарный режим второго типа. Наконец, если сумма средних значений чисел задействованных путей на станциях и чисел задействованных путей в зонах временного хранения грузов в начальный момент времени больше  $\Delta + V$ , то система переходит в стационарный режим третьего типа. Таким образом, для чтобы наилучшим образом использовать технический потенциал станций при движении по замкнутой цепочке станций достаточно в начальный момент времени обеспечить соответствующую загрузку как станций, так и зон временного хранения грузов.

Наконец, представим модель организации грузоперевозок в рамках третьей конфигурации железнодорожной сети – железнодорожная линия между двумя узловыми станциями. При организации грузоперевозок в рамках данной конфигурации железнодорожной сети одинаково важны как процедура взаимодействия промежуточных станций, так и процедуры, связанные с приемом грузов на начальной узловой станции и отправкой грузов с конечной узловой станции. Поэтому построение таких моделей проводится с учетом узловых станций и их влияния на систему грузоперевозок. Здесь также, как и при описании грузоперевозок по замкнутой цепочке станций, рассматриваются два варианта модели: без ограничения на емкость зон временного хранения грузов и с ограничением на указанные емкости.

Начнем с описания модели не учитывающей ограниченность емкостей зон временного хранения грузов. Проведем нумерацию станций. Железнодорожная линия соединяющая узловые станции содержит ряд промежуточных станций. Пусть их число равно  $m$ . Обозначив через 0 и  $m + 1$  номера начальной и конечной узловых станций, получим следующее множество номеров станций  $\{0, 1, \dots, m, m + 1\}$ . Интенсивность потока грузов поступающих на начальную узловую станцию с железнодорожных направлений будем описывать с помощью функции  $\psi_1(\cdot)$ , интенсивность потока грузов распределяющихся с конечной узловой станции – с помощью функции  $\psi_2(\cdot)$ . Тогда модель, описывающая процесс грузоперевозок между

двумя узловыми станциями с заданной системой контроля, задается следующим образом:

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

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

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

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

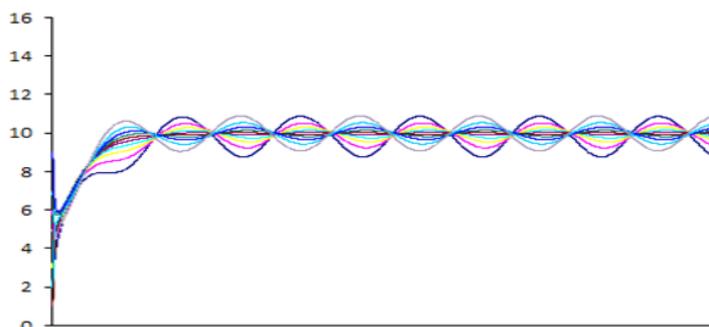
Функция  $\varphi_0(\cdot)$  описывает вторую технологию на начальной узловой станции. На ней вторая технология используется только для разгрузки и поэтому она обладает следующими свойствами: на полупрямой  $(-\infty, \Delta]$  тождественно равна 0, а на полупрямой  $(\Delta, +\infty)$  является линейно убывающей.

Вспомним, что в моделях, описывающих организацию транснациональных грузоперевозок (неограниченное число станций) и по замкнутой цепочке станций правило приема и правило отправки грузов на произвольной станции зависели от числа задействованных путей на соседних станциях. В данной модели для начальной и конечной узловых станций данное свойство потока не выполняется. Это приводит к тому, что за исключением случая, когда функции  $\psi_1(\cdot)$  и  $\psi_2(\cdot)$  тождественно равны нулю (не имеющего экономического смысла) система (8)–(11) не имеет решения, т.е. невозможна организация грузопотока в рамках указанных технологий с описанной системой контроля. Это приводит к необходимости корректировки либо технологий грузоперевозок, либо системы контроля.

В первом случае такая корректировка заключается в том, чтобы, управляя интенсивностью приема грузов на начальной узловой станции и интенсивностью отправки грузов с конечной узловой станции, добиться организации грузопотока с указанной системой контроля. Она предполагает эндогенные задания функций  $\psi_1(\cdot)$  и  $\psi_2(\cdot)$ , начиная с момента времени, равного характеристике системы контроля. Однако, такая организация грузопотока связана с импульсными изменениями числа задействованных путей на станциях (наличие разрывов в точках кратных характеристике системы контроля  $\tau$ ). Доказано, что импульсными изменениями функции  $\psi_1(\cdot)$  в начале отрезка  $[0, \tau]$  можно указанные разрывы сделать сколь угодно малыми. Еще один способ уменьшения указанных разрывов заключается в управлении параметрами модели, а именно, нормативом правила взаимодействия соседних

станций  $\alpha$ , а также параметрами, описывающими функции  $\varphi(\cdot)$  и  $\varphi_0(\cdot)$  (возможности второй технологии).

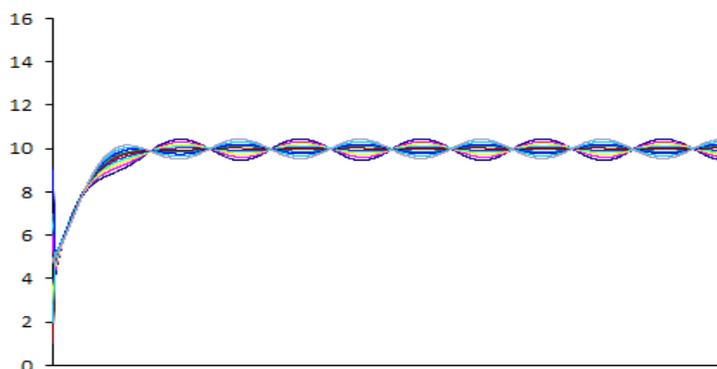
Корректировка системы контроля заключается в ее ослаблении, т.е. допускает выполнение условия (11) с некоторой погрешностью. Исследование системы (8)-(10) показало, что для одинаковых функций  $\psi_1(\cdot)$  и  $\psi_2(\cdot)$  ее решения начиная с некоторого момента времени начинают колебаться вокруг значения  $\Delta$  (оптимальная загрузка станций) с некоторой амплитудой (рис. 14).



**Рис. 14.** Решения системы (8)–(10)

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

Исследована зависимость указанной амплитуды от параметров модели ( $\alpha$ , параметры функций  $\varphi_0(\cdot)$ ,  $\varphi(\cdot)$ ). Показано, что, управляя этими параметрами, характеризующими нормативные правила взаимодействия соседних станций и возможности второй технологии, можно сделать указанную амплитуду сколь угодно малой (рис. 15). Суть этого управления сводится к улучшению инфраструктуры станций.



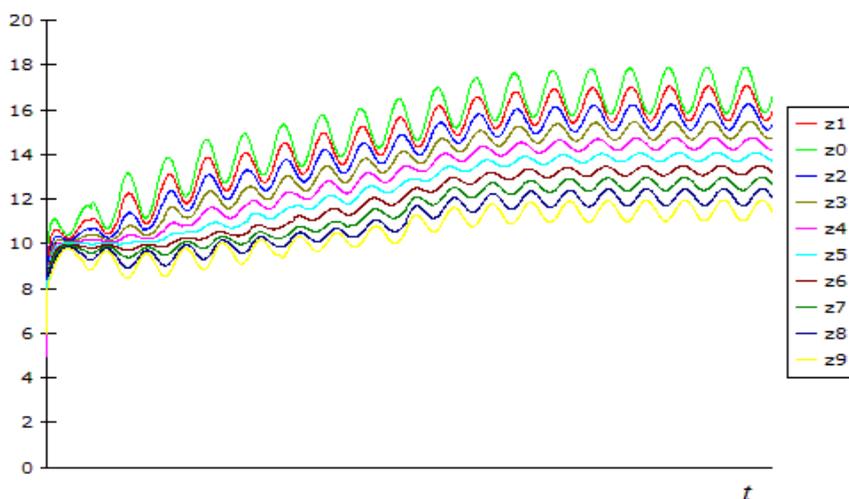
**Рис. 15.** Решения системы (8)–(10).

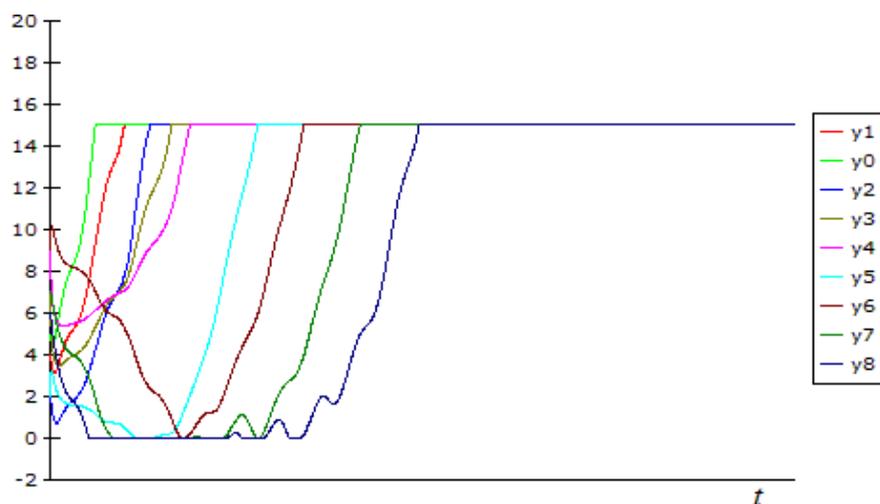
Снижение погрешности в выполнении условия (11)

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

Перейдем к описанию модифицированной модели грузоперевозок между двумя узловыми станциями, учитывающей ограниченность зон временного хранения грузов. Как уже было отмечено ранее при такой модификации модели корректируются правила взаимодействия соседних станций, приводящие к корректировке уравнений (8)–(11), а также к появлению дополнительных уравнений, описывающих динамику числа задействованных путей в зонах временного хранения грузов.

Опишем результаты, полученные при исследовании этой модели. В зависимости от соотношения интенсивности подачи грузов на начальную узловую станцию и интенсивности распределения грузов с конечной узловой станции выделено три типа режимов грузоперевозок. Первый тип режимов грузоперевозок определяет динамику числа задействованных путей на станциях и в зонах временного хранения грузов в случае, когда интенсивность распределения грузов с конечной узловой станции меньше интенсивности отправки грузов на начальную узловую станцию. В этом случае с течением времени происходит полное заполнение зон временного хранения грузов и при этом станции не могут принять грузы с них вследствие сильной загруженности (рис. 16).

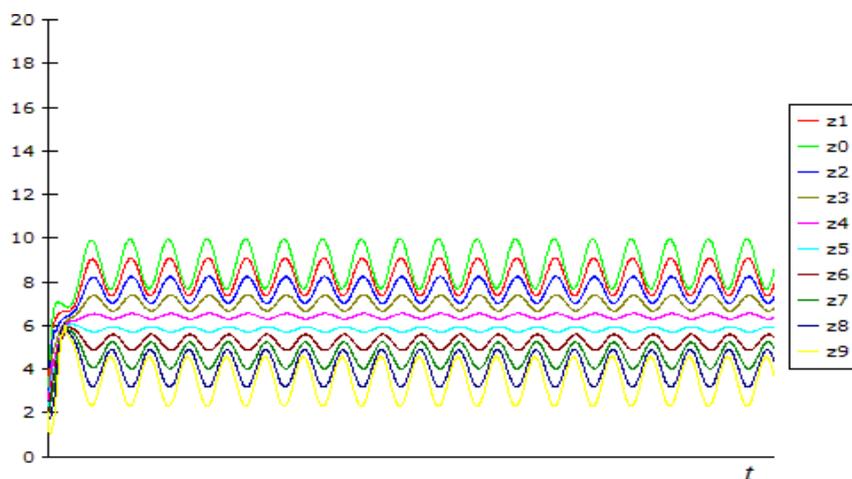




**Рис. 16.** Первый тип режимов грузоперевозок

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

Второй тип режимов грузоперевозок определяет динамику числа задействованных путей на станциях и в зонах временного хранения грузов в случае, когда интенсивность распределения грузов с конечной узловой станции равна интенсивности отправки грузов на начальную узловую станцию. В этом случае, в зависимости от загруженности станций в начальный момент времени, возможны три типа указанной динамики. Если в начальный момент времени все станции задействованы незначительно, то с течением времени запасы грузов во всех зонах временного хранения заканчиваются, станции загружаются до уровня ниже оптимального и впоследствии движение грузов происходит от одной станции к другой (без привлечения зон временного хранения грузов) (рис. 17).



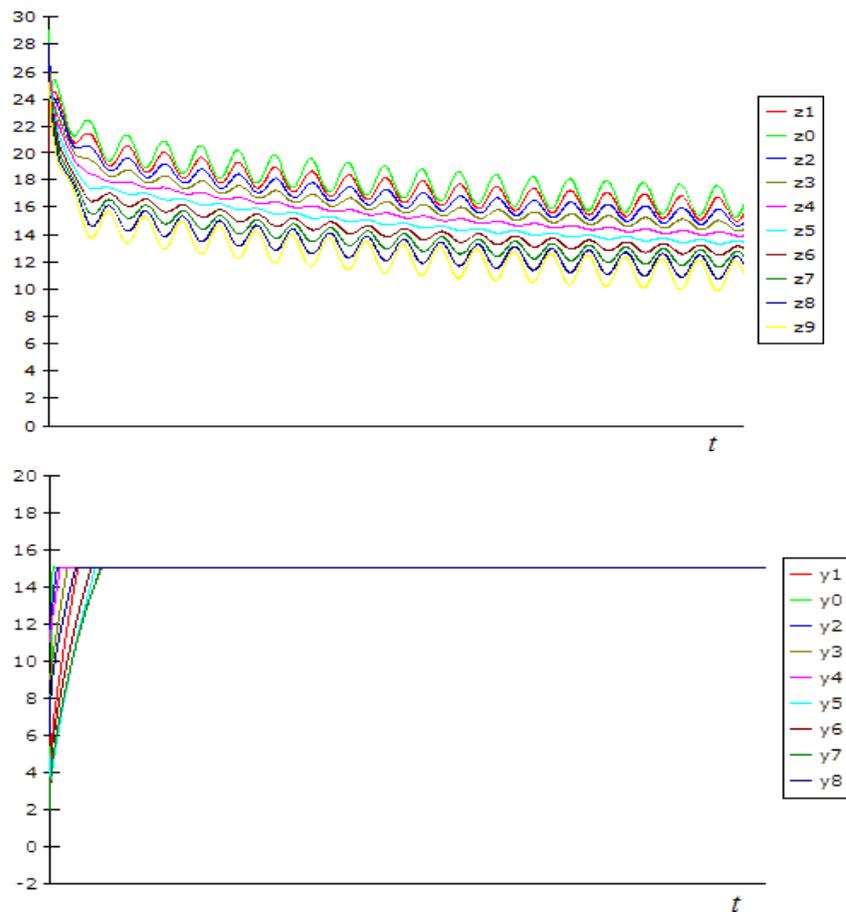


**Рис. 17.** Второй тип режимов грузоперевозок

(низкая степень загрузки станций в начальный момент времени)

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

Противоположная степень заполненности станций в начальный момент времени (критическое переполнение на всех станциях) на практике крайне маловероятна (рис. 18).

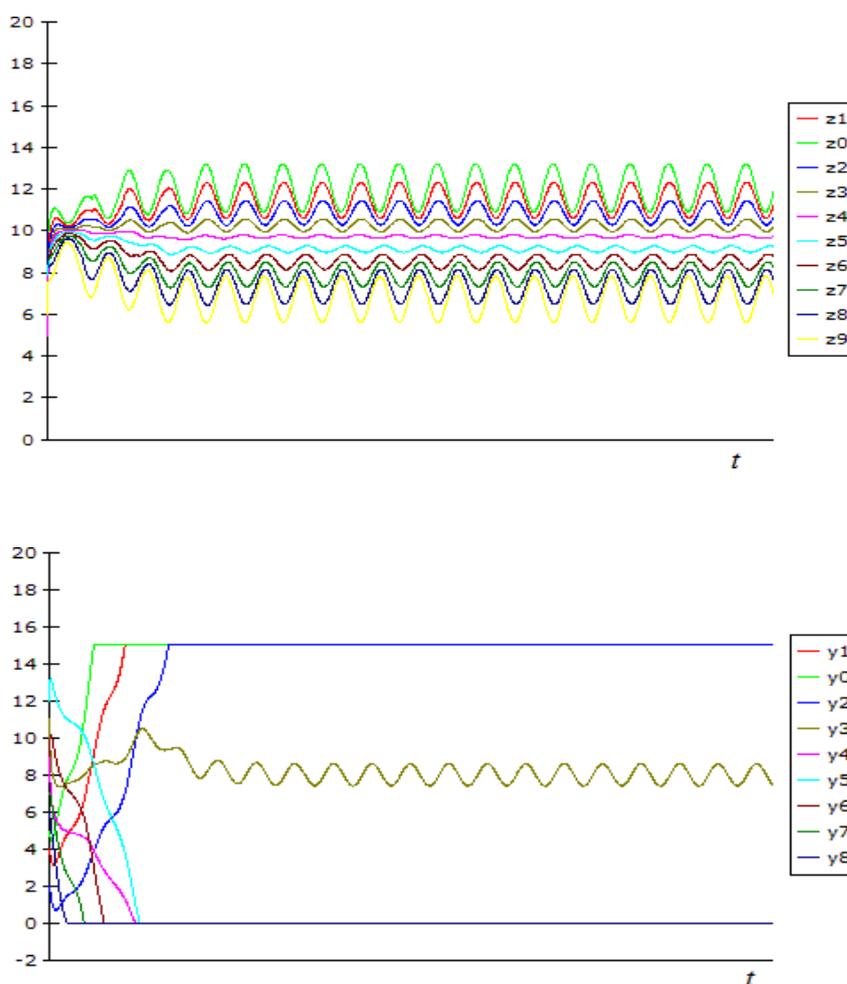


**Рис. 18.** Второй тип режимов грузоперевозок

(высокая степень загрузки станций в начальный момент времени)

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

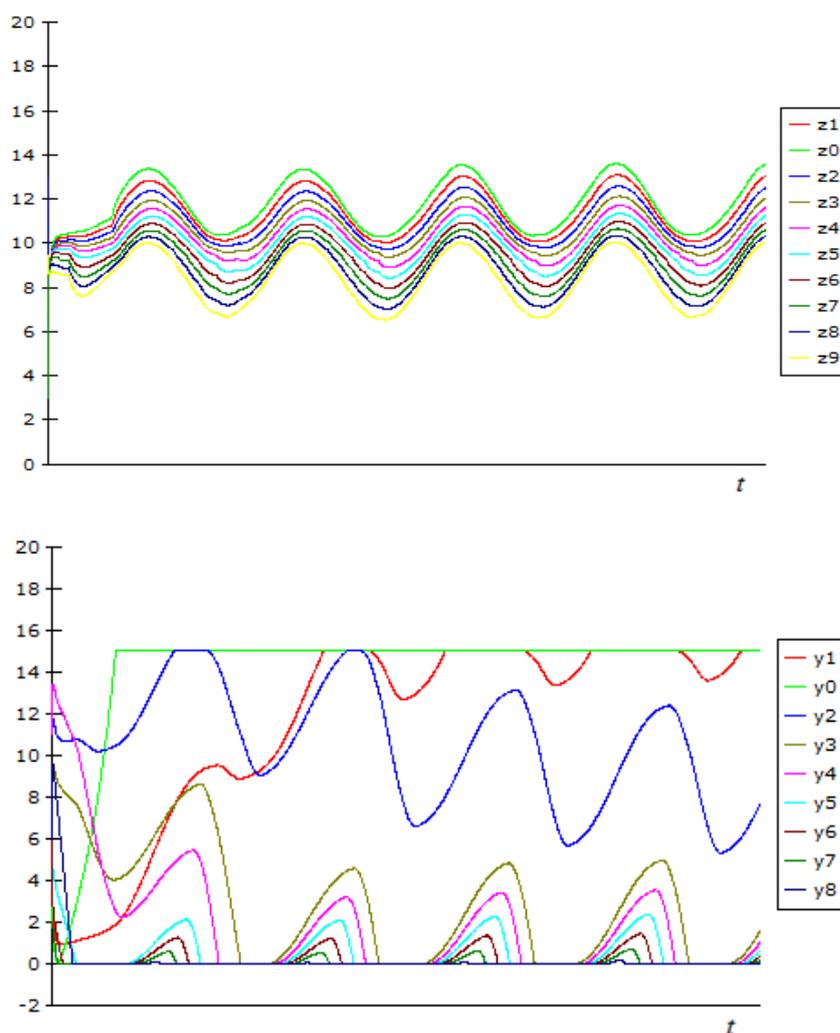
Наконец, при наиболее вероятной степени заполненности железнодорожной линии между двумя узловыми станциями (загруженность отдельных станций) в начальный момент времени происходит наиболее оптимальная их загрузка, соответствующая наиболее эффективному использованию инфраструктурных возможностей станций. При этом происходит переполнение зон временного хранения грузов, близких к начальной узловой станции и освобождение зон временного хранения грузов, близких к конечной узловой станции (рис.19). Однако, данную проблему можно решить, если интенсивность распределения грузов с конечной узловой станции задать таким же образом, как и интенсивность подачи грузов на начальную узловую станцию, но с некоторым сдвигом во времени, т.е. синхронизировать подачу грузов на начальную узловую станцию и распределение грузов с конечной узловой станции (рис. 20).



**Рис. 19.** Второй тип режимов грузоперевозок

(средняя степень загрузки станций в начальный момент времени)

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

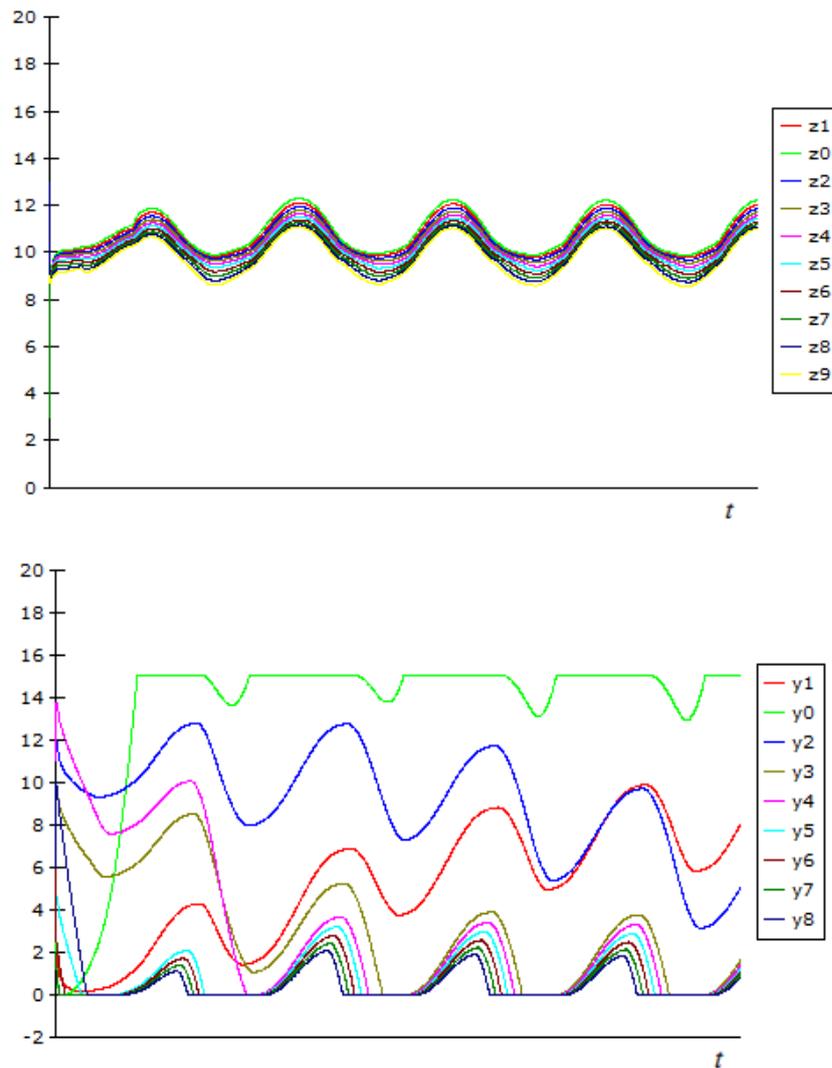


**Рис. 20.** Второй тип режимов грузоперевозок

(средняя степень загрузки станций в начальный момент времени;  
синхронизация подачи грузов на начальную узловую станцию и распределения  
грузов с конечной узловой станции)

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

Важно подчеркнуть, что так же, как и в модели, не учитывающей ограниченность зон временного хранения грузов, увеличение параметра, характеризующего нормативные правила взаимодействия соседних станций, приводит к уменьшению амплитуды колебания числа задействованных путей на станциях вокруг оптимального значения (рис. 21).



**Рис. 21.** Второй тип режимов грузоперевозок  
(средняя степень загрузки станций в начальный момент времени;  
увеличение параметра, характеризующего нормативные правила взаимодействия  
соседних станций)

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

Третий тип решений определяет динамику числа задействованных путей на станциях и в зонах временного хранения грузов в случае, когда интенсивность распределения грузов с конечной узловой станции превышает интенсивность отправки грузов на начальную узловую станцию. В этом случае с течением времени происходит освобождение зон временного хранения грузов, а загруженность станций уменьшается вплоть до их полного бездействия.

Однако, если разность в интенсивностях распределения грузов с конечной узловой станции и подачи грузов на начальную узловую станцию невелика, то

можно утверждать, что на протяжении всего горизонта планирования можно осуществлять грузоперевозки с помощью указанных технологий.

**3. Сформированные модели, синхронизирующие входные и выходные потоки на станциях, обеспечивают более эффективную организацию грузоперевозок, минимизируют задержки и осуществляют плавный грузопоток. Они могут служить инструментом для прогнозирования динамики грузопотока в случае переменного спроса на грузоперевозки.**

Перейдем к построению моделей организации грузоперевозок в случае отсутствия стабильно высокого спроса на грузоперевозки. В этих условиях нет необходимости задействовать потенциал станций в полной мере и, соответственно, в отправке части грузов в специальные зоны между станциями для временного хранения. Напомним, что наличие специальных зон хранения грузов между станциями потребовало введение системы контроля. Таким образом, движение грузов происходит только от одной станции к другой и, как следствие, без системы контроля.

Приведем модели, описывающие процесс грузоперевозок между двумя узловыми станциями. Грузопоток формируется поступившими на начальную узловую станцию грузами с учетом технического потенциала станций. Главной задачей является синхронизация грузопотока с учетом интенсивности подачи грузов на начальную узловую станцию, технического потенциала станций и режима распределения грузов с конечной узловой станцией. Как и ранее, обозначим через  $m$  число промежуточных станций,  $0$  – номер начальной узловой станции, а  $m + 1$  – номер конечной узловой станции. Обозначим через  $n_i$  число путей на станции с номером  $i$ .

Рассмотрим дискретные моменты времени

$$t_0, t_1, t_2, \dots; t_k = t_{k-1} + \Delta t, k = 1, 2, \dots$$

Пусть  $\bar{V}_{ij}(t_k)$  – объем грузов, принятых на  $j$ -ом пути  $i$ -ой станции за отрезок времени  $[t_{k-1}, t_k]$ , а  $\bar{\bar{V}}_{ij}(t_k)$  – объем грузов, отправленных с  $j$ -ого пути  $i$ -ой станции за отрезок времени  $[t_{k-1}, t_k]$ . Обозначим

$$x_{ij}(t_k) = \begin{cases} \frac{\bar{V}_{ij}(t_k) - \bar{\bar{V}}_{ij}(t_k)}{\bar{V}_{ij}(t_k)}, & \text{если } \bar{V}_{ij}(t_k) > \bar{\bar{V}}_{ij}(t_k) \\ 0, & \text{если } \bar{V}_{ij}(t_k) \leq \bar{\bar{V}}_{ij}(t_k). \end{cases}$$

Очевидно, что

$$0 \leq x_{ij}(t_k) \leq 1, \quad i = 0, 1, \dots, m + 1; \quad j = 1, 2, \dots, n_i$$

и характеризуют степень несогласованности между приемом и отправкой грузов на  $j$ -ом пути  $i$ -ой станции в момент времени  $t_k$ . Обозначим

$$z_i(t_k) = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}(t_k).$$

Также очевидно, что  $0 \leq z_i(t_k) \leq 1$  и характеризует степень несогласованности между приемом и отправкой грузов на  $i$ -ой станции в момент времени  $t_k$ .

Начнем описание таких моделей с частного случая, который характеризуется идентичностью технических потенциалов всех станций. Технический потенциал станции определяется максимально допустимым приростом степени несогласованности между приемом и отправкой грузов за единицу времени и задается неотрицательной убывающей функцией  $\varphi(z)$  определенной на отрезке  $[0,1]$  и удовлетворяющей условию  $\varphi(1) = 0$ .

Начальная узловая станция принимает грузы в зависимости от спроса на перевозки в рамках своего технического потенциала и отправляет на следующую станцию в рамках ее технического потенциала. Каждая из промежуточных станций принимает грузы в рамках своего технического потенциала и отправляет в рамках технического потенциала следующей станции. Конечная узловая станция принимает грузы в рамках своего технического потенциала и распределяет в определенном режиме. Динамика степени несогласованности между приемом и отправкой грузов на станциях описывается системой дифференциальных уравнений (12)–(14), удовлетворяющей ограничениям (15).

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

$$\dot{z}_i(t) = \lambda[\varphi(z_i(t)) - \varphi(z_{i+1}(t))], \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad t \in [t_0, +\infty), \quad (13)$$

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

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

Здесь  $d_0 > 0$ ,  $0 < \lambda \leq 1$ ,  $d_{m+1} > 0$  – 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.

Далее рассмотрим функцию  $\varphi(z)$  следующего вида

$$\varphi(z) = a(1 - z), \quad a > 0. \quad (16)$$

Параметр  $a > 0$ , участвующий в определении функции  $\varphi(z)$ , является характеристикой возможности станций по наращиванию грузопотока. Так как  $\varphi(z) \leq a$  для всех  $0 \leq z \leq 1$ , то параметр  $d_0$ , являющийся характеристикой спроса на перевозки и участвующий в уравнении (12), можно представить следующим образом:

$$d_0 = \mu a, \quad 0 < \mu \leq 1. \quad (17)$$

Параметр  $d_{m+1}$ , являющийся характеристикой режима распределения грузов с конечной узловой станции, представим следующим образом:

$$d_{m+1} = \gamma a, \quad \gamma > 0. \quad (18)$$

Перепишем систему (12)–(15), в которой функция  $\varphi(z)$  определена согласно (16), а параметры  $d_0$  и  $d_{m+1}$  – согласно (17) и (18) соответственно.

$$\dot{z}_0(t) = \min(\mu a, a(1 - z_0(t))) - \lambda a(1 - z_1(t)), \quad t \in [t_0, +\infty), \quad (19)$$

$$\dot{z}_i(t) = \lambda a (z_{i+1}(t) - z_i(t)), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad t \in [t_0, +\infty), \quad (20)$$

$$\dot{z}_{m+1}(t) = \lambda a(1 - z_{m+1}(t)) - \gamma a, \quad t \in [t_0, +\infty), \quad (21)$$

$$0 \leq z_i(t) \leq 1, \quad i = 0, 1, \dots, m + 1, \quad t \in [t_0, +\infty). \quad (22)$$

Здесь  $\mu$ ,  $a$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma$  – параметры модели:

$\mu$  ( $0 < \mu \leq 1$ ) – характеристика диапазона спроса на перевозки, который может быть удовлетворен при имеющемся техническом потенциале станций;

$a$  ( $a > 0$ ) – характеристика возможности станции по наращиванию грузопотока;

$\lambda$  ( $0 < \lambda \leq 1$ ) – характеристика степени использования технического потенциала станций;

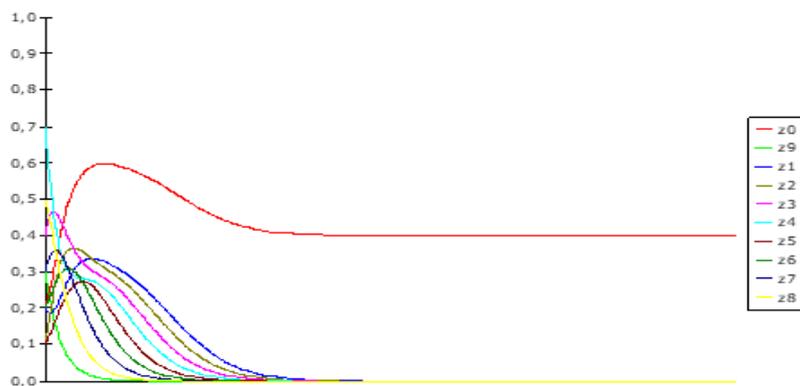
$\gamma$  ( $\gamma > 0$ ) – характеристика режима распределения грузов с конечной узловой станции.

Основные задачи исследования:

- определить диапазоны изменения параметров  $\mu$ ,  $a$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma$ , при которых система грузоперевозок может бесперебойно функционировать, т.е. система (19)–(22) имеет решение, описать качественное поведение решений в зависимости от параметров.

- для заданного значения характеристики спроса на грузоперевозки (параметр  $\mu$ ) установить наиболее приемлемые достижимые уровни степени несогласованности между приемом и отправкой грузов на всех станциях, за счет управления значениями следующих характеристик: возможности станций по наращиванию грузопотока (параметр  $a$ ), степени использования технического потенциала станций (параметр  $\lambda$ ) и режима распределения грузов с конечной узловой станции (параметр  $\gamma$ ).

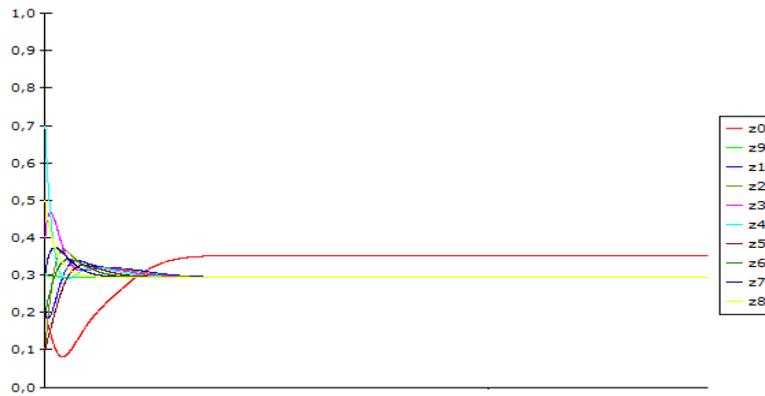
Приведем результаты исследования системы (19)–(22). Она имеет бесконечное множество стационарных решений, причем произвольное ее решение с течением времени сходится к одному из них. Для произвольного значения характеристики спроса на перевозки (параметр  $\mu$ ), который может быть удовлетворен при имеющемся техническом потенциале станций и согласованного с ним режима распределения грузов с конечной узловой станции ( $\gamma \leq \mu$ ) существует диапазон изменения характеристики степени использования технического потенциала станций ( $\lambda \in [\mu, \tilde{\lambda}]$ ), при которых можно организовать бесперебойный грузопоток (существует решение системы (19)–(22)). С точки зрения минимизации степени несогласованности между приемом и отправкой грузов на станциях целесообразно параметр  $\gamma$  взять равным параметру  $\mu$ . Таким образом, единственным управляемым параметром является  $\lambda$  (степень использования технического потенциала станций). На рис. 22, рис. 23 и рис. 24. приведены графики решений системы (19)–(22) при фиксированном значении параметра  $\gamma$  ( $\gamma = \mu$ ) и трех разных значений параметра  $\lambda$ : два на концах отрезка  $[\mu, \tilde{\lambda}]$  и одно во внутренней точке.



**Рис. 22.** График решения системы (19)–(22)

$$\gamma = \mu = \lambda = 0.6$$

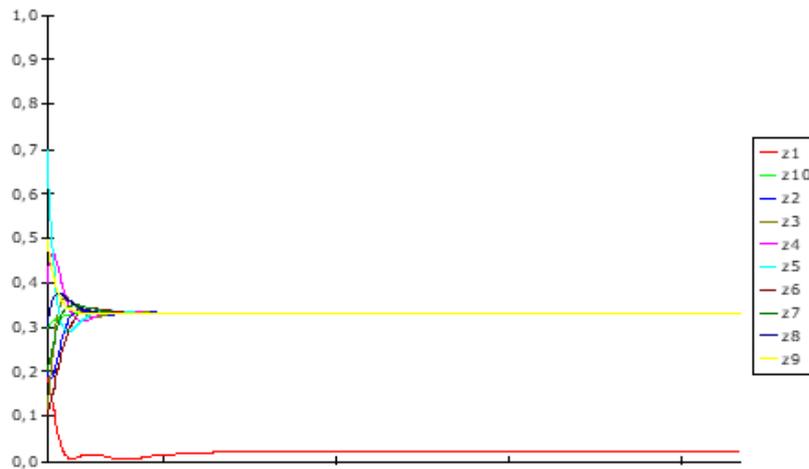
*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*



**Рис. 23.** График решения системы (19)–(22)

$$\gamma = \mu = 0.6, \quad \lambda = 0.85$$

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*



**Рис. 24.** График решения системы (19)–(22)

$$\gamma = \mu = 0.6, \quad \lambda = \tilde{\lambda} = 0.898$$

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

Увеличение значения параметра  $\lambda$  приводит к асимптотическому уменьшению нулевой компоненты решения системы (19)–(22). Остальные компоненты решения с увеличением значения параметра  $\lambda$  асимптотически увеличиваются и сходятся к одному и тому же значению. Это означает, что управляя параметром  $\lambda$  можно установить наиболее приемлемую степень несогласованности между приемом и отправкой грузов на всех станциях. Если взять  $\lambda$  равным  $\mu$  (т.е. согласовать степень использования технического потенциала станций с уровнем спроса на грузоперевозки), то со временем степень несогласованности между приемом и отправкой грузов на всех

станциях кроме нулевой станет равной нулю, а на нулевой станции  $-1 - \mu$ . Если значение  $\mu$  близко к единице, то такой выбор параметра  $\lambda$  будет оптимальным. В противном случае, все будет зависеть от конкретного значения параметра  $\mu$ , а также от того, насколько важно в той или иной ситуации уменьшение степени несогласованности между приемом и отправкой грузов на начальной узловой станции за счет увеличения данной характеристики на остальных станциях.

Перейдем к общей постановке модели, предполагающей различия в технических потенциалах станций. Технический потенциал станции с номером  $i$ ,  $i = 0, 1, \dots, m + 1$  определяется непрерывной убывающей функцией  $\varphi_i(z)$ , определенной на отрезке  $[0,1]$  и удовлетворяющей условию  $\varphi_i(1) = 0$ , а степень ее использования с помощью параметра  $\lambda_i$ .

Далее приведены результаты исследования этой модели для функций  $\varphi_i(z)$  следующего вида

$$\varphi_i(z_i) = a_i(1 - z_i), \quad i = 0, 1, \dots, m, m + 1.$$

Параметр  $a_i > 0$ , участвующий в определении функции  $\varphi_i(z)$ , является характеристикой возможности станции с номером  $i$  по наращиванию грузопотока. Из определения функции  $\varphi_i(z)$  следует, что параметр  $d_0$ , являющийся характеристикой спроса на перевозки, можно представить следующим образом:

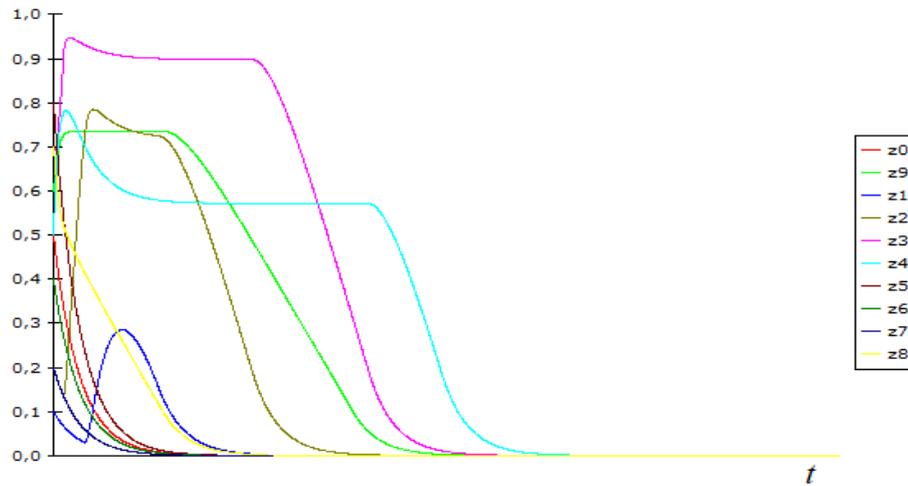
$$d_0 = \mu a_0, \quad 0 < \mu \leq 1.$$

Модель имеет бесконечное множество стационарных режимов, причем произвольный режим грузоперевозок с течением времени сходится к одному из них. Сходимость к тому или иному стационарному режиму зависит как от начальных значений степеней несогласованности между приемом и отправкой грузов на станциях, так и от параметров модели. Исследование позволило выявить три конфигурации параметров модели при которых сходимость к стационарному решению является глобально устойчивой.

*Первая конфигурация параметров модели:  $d_0 < d$  и  $d_0 < d_{m+1}$ ,*

$$\text{где } d = \lambda_k a_k = \min(\lambda_1 a_1, \lambda_2 a_2, \dots, \lambda_{m+1} a_{m+1})$$

Данная конфигурация параметров модели соответствует низкому спросу на грузоперевозки. В этом случае степень несогласованности между приемом и отправкой грузов на всех станциях со временем становится равной нулю (рис. 25).

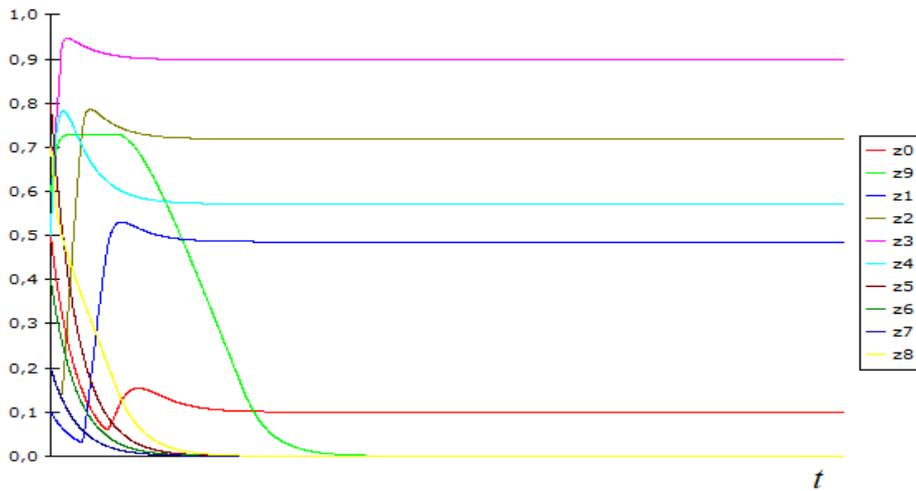


**Рис. 25.** Сходимость к глобально устойчивому стационарному режиму (первая конфигурация параметров модели)

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

*Вторая конфигурация параметров модели:  $d_0 > d$  и  $d_{m+1} > d$*

Данная конфигурация параметров модели соответствует уровню спроса, превышающего техническую возможность хотя бы одной станций, при этом режим распределения грузов с конечной узловой станции достаточно интенсивный. В этом случае степень несогласованности между приемом и отправкой грузов на некоторых станциях со временем становится равной нулю, тогда как на других устанавливается на разных ненулевых значениях, зависящих от параметров модели (рис. 26).

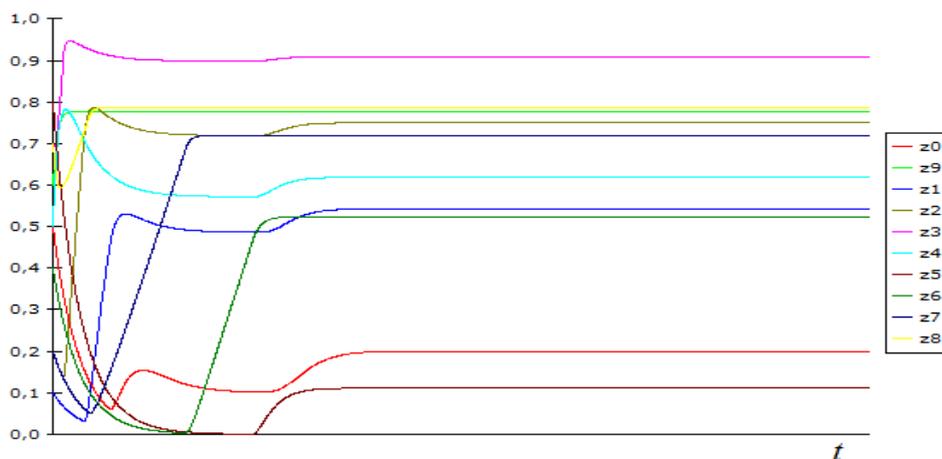


**Рис. 26.** Сходимость к глобально устойчивому стационарному режиму (вторая конфигурация параметров модели)

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

*Третья конфигурация параметров модели:  $d_0 > d_{m+1}$  и  $d_{m+1} < d$*

Эта конфигурация параметров модели в отличие от предыдущей соответствует распределению грузов с конечной узловой станции с низкой интенсивностью. Степень несогласованности между приемом и отправкой грузов на всех станциях устанавливается на разных ненулевых значениях, зависящих от параметров модели (рис. 27).



**Рис. 27.** Сходимость к глобально устойчивому стационарному режиму (третья конфигурация параметров модели)

*Источник: составлено автором на основе модельных экспериментов*

Отметим, что параметры  $\lambda_i, i = 1, \dots, m + 1$ , характеризующие степени использования технического потенциала станций и  $d_{m+1}$ , характеризующий режим распределения грузов с конечной узловой станции в отличие от остальных являются управляемыми и могут быть определены на любом уровне внутри заданного диапазона в зависимости от значений остальных параметров. Это позволило таким образом их подобрать, чтобы добиться того, что со временем степень несогласованности между приемом и отправкой грузов по крайней мере на всех станциях кроме начальной узловой станет равна нулю, независимо от их значений в начальный момент времени и значений других параметров.

***Предложенный подход к решению задачи управления парком грузовых железнодорожных вагонов позволяет осуществлять поиск оптимального плана перевозок на множестве всевозможных маршрутов, что увеличивает точность полученного решения.***

Предложен один из подходов к решению задачи, которая стоит перед операторами железнодорожного транспорта – оптимальное управление парком грузовых вагонов с целью максимизации прибыли. Транспортный оператор получает от заказчиков заявки, содержащие станцию отправления, станцию назначения, наименование и объем груза, который предполагается перевезти, а также ставку за перевозку одного вагона. Кроме того, ему известно местоположение вагонов к началу планового периода. Транспортный оператор не обязан выполнять все поступающие заявки: как правило, он физически не может этого сделать за отведенный период. Поэтому он может либо выполнить заявку полностью, либо исполнить ее частично, либо отклонить ее. Таким образом, при создании плана на предстоящий период задача транспортного оператора заключается, во-первых, в выборе тех заявок, которые наиболее выгодны к исполнению, во-вторых, в выборе таких цепочек грузовых и порожних маршрутов, которые с наибольшей эффективностью обеспечат выполнение выбранных заявок.

Непосредственная транспортировка вагонов осуществляется силами Российских железных дорог (ОАО «РЖД»), которые устанавливают свои тарифы на перегоны как порожних, так и груженых рейсов. Также заранее известны нормативы по времени таких перегонов по каждому из возможных маршрутов. Предполагается, что тарифы

не зависят от количества вагонов, перевозимых одним рейсом. Если заявка заказчика исполнена, то он, помимо платежа оператору в соответствии с указанной ставкой за использование его вагонов, отдельно платит РЖД за транспортировку этих вагонов. Перемещение порожних вагонов силами РЖД является статьей расходов транспортного оператора. Поскольку тарифы РЖД на транспортировку грузовых вагонов являются издержками заказчиков (транспортные операторы к ним никакого отношения не имеют), в модели эти тарифы отсутствуют.

Приведем постановку данной задачи. Для этого введем ряд обозначений:

$N$  – количество станций, участвующих в планировании;

$T$  – горизонт планирования, который измеряется в днях. Для упрощения за горизонт планирования принят один месяц;

$t$  – дискретный параметр, характеризующий время. Он измеряется в днях и принимает значения  $t = 1, 2, \dots, T$ ;

$C = \{C_{ij}\}_{i,j=1}^N$  –  $(N \times N)$ -матрица, элементы которой характеризуют тарифы, установленные РЖД за порожний перегон одного вагона от станции  $i$  до станции  $j$ ;

$P = \{P_{ij}\}_{i,j=1}^N$  –  $(N \times N)$ -матрица, элементы которой характеризуют ставку, указанную заказчиком в заявке на транспортировку одного вагона груза от станции  $i$  до станции  $j$ ;

$\bar{Q} = \{\bar{Q}_{ij}\}_{i,j=1}^N$  –  $(N \times N)$ -матрица, элементы которой характеризуют количество грузовых вагонов, указанное в соответствующей заявке на транспортировку груза от станции  $i$  до станции  $j$ . Все элементы матрицы принимают неотрицательные целочисленные значения.

План перевозок характеризуется следующими матрицами:

$K1(t) = \{K1_{ij}(t)\}_{i,j=1}^N$  –  $(N \times N)$ -матрица, элементы которой характеризуют количество отправляемых груженых вагонов от станции  $i$  до станции  $j$  на момент времени  $t \in \{1, \dots, T\}$ . Все элементы матрицы принимают неотрицательные целочисленные значения;

$K2(t) = \{K2_{ij}(t)\}_{i,j=1}^N$  –  $(N \times N)$ -матрица, элементы которой характеризуют количество порожних вагонов, отправляемых от станции  $i$  до станции  $j$  на момент

времени  $t \in \{1, \dots, T\}$ . Все элементы матрицы принимают неотрицательные целочисленные значения.

Обозначим через  $K1$  и  $K2$  набор соответствующих матриц для всех моментов времени  $t \in \{1, \dots, T\}$ , иначе говоря,  $K1 = \{K1(t)\}_{t=1}^T$ ,  $K2 = \{K2(t)\}_{t=1}^T$ .

Также интерес представляет распределение вагонов по станциям и по времени в плановый месяц в соответствии с предложенным планом  $K1$ ,  $K2$ . Для этого в рассмотрение вводится вектор  $\bar{S}(t, K1, K2)$ .

$\bar{S}(t, K1, K2) = \{\bar{S}_i(t, K1, K2)\}_{i=1}^N$  – вектор длины  $N$ , каждый элемент которого характеризует количество вагонов на станции  $i$  в момент времени  $t \in \{1, \dots, T\}$ . Количество вагонов, которое наблюдается на станции  $i$  в момент времени  $t$ , равно количеству отправленных в предыдущем месяце вагонов, а также тому количеству вагонов, которое было направлено на станцию  $i$  в соответствии с планом  $K1$  и  $K2$ , т.е. в дни  $\tau$ , предшествующие текущему дню  $t$  ( $\tau \in \{1, \dots, t - 1\}$ ), и которые прибывают на станцию  $i$  именно в этот день  $t$ .

Теперь можно сформулировать математическую постановку данной задачи. Критерием максимизации является прибыль

$$\sum_{t=1}^T (\sum_{i,j=1}^N P_{ij} K1_{ij}(t) - \sum_{i,j=1}^N C_{ij} K2_{ij}(t)) \rightarrow \max_{\{K1_{ij}(t), K2_{ij}(t)\}} \quad (23)$$

При этом должны выполняться следующие ограничения:

$$\bar{S}_i(t, K1, K2) = \sum_{j=1}^N (K1_{ij}(t) + K2_{ij}(t)), \quad i = \overline{1, N}, \quad t = \overline{1, T}; \quad (24)$$

$$\sum_{t=1}^T K1_{ij}(t) \leq \bar{Q}_{ij}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, N}; \quad (25)$$

$$K1_{ij}(t) \in \mathbb{N} \cup \{0\}, \quad K2_{ij}(t) \in \mathbb{N} \cup \{0\}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, N}, \quad t = \overline{1, T}. \quad (26)$$

Целевая функция (23) представляет собой прибыль от всех грузовых перегонов за вычетом издержек, связанных с перегоном порожних вагонов. Оптимизация осуществляется за счет управления груженными рейсами  $K1_{ij}(t)$  и порожними рейсами  $K2_{ij}(t)$ . Ограничение (24) является балансовым и означает, что количество вагонов, отправляемых со станции  $i$  в момент времени  $t$ , в точности равно количеству вагонов, которые в этот день туда прибыли. Ограничение (25) говорит о том, что количество грузовых вагонов, отправленных со станции  $i$  на станцию  $j$  во все дни расчетного

периода, не должно превышать того количества, которое указано в соответствующей заявке.

Задача (23)-(26) может быть решена напрямую методами целочисленного программирования. Однако в силу большой размерности задача поиска целочисленного решения может оказаться невыполнимой в пределах разумного времени. Поэтому вместо исходной задачи рассматривается ее линейная релаксация. Это означает, что вместо условия (26) рассматривается следующее, более слабое условие:

$$K1_{ij}(t) \geq 0, K2_{ij}(t) \geq 0, \quad i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N}, \quad t = \overline{1, T}. \quad (27)$$

Таким образом, вместо задачи (23)-(26) рассматривается задача (23), (24), (25), (27). Результатом решения такой задачи может оказаться дробное решение, которое, очевидно, не может быть применено на практике. В этом случае, для получения целочисленного решения к полученному дробному решению необходимо применить методы округления.

Предложенный подход основан на использовании сети всевозможных маршрутов отправки грузов от станций отправления к станциям назначения с последующим исключением из расчетов тех груженых или порожних маршрутов, которые, как предполагается, не будут задействованы в итоговом решении, либо вероятность их использования крайне мала. Отметим, что в задачах, которые встречаются на практике, как правило наблюдается многократное снижение размерности благодаря исключению из расчета большего числа порожних маршрутов за счет дополнительных признаков (например, исключать слишком дорогие, слишком дальние порожние перегоны). Построен алгоритм, формализующий данный подход в виде классической задачи линейного программирования. Преимущество предложенного подхода заключается в том, что он позволяет найти оптимальный план перевозок на всём множестве возможных маршрутов. В то же время методы, связанные с генерацией колонок, решают серию задач линейного программирования на подмножествах множества всех маршрутов. Это может привести к тому, что полученное решение будет отличаться от оптимального. На практике это может означать упущенную выгоду для транспортного оператора в размере десятков миллионов рублей в месяц.

**Положения и выводы диссертационного исследования нашли отражение в следующих публикациях автора:**

***Монография:***

1. Хачатрян, Н.К. Моделирование процесса организации железнодорожных грузоперевозок: монография / Н.К. Хачатрян. – Москва: МАКС Пресс, 2023. – 168 с. : ил. – ISBN 978-5-317-07005-2.

***Работы, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI:***

2. Khachatryan, N. Synchronization of Inbound and Outbound Flows at Stations in the Model of Freight Transportation Organization / N. Khachatryan // *Advances in Systems Science and Applications*. – 2024. – Vol. 24, № 1. – P. 82–94 (SJR – 0.215).
3. Khachatryan, N. Bifurcation in the model of cargo transportation organization / N. Khachatryan // *Advances in Systems Science and Applications*. – 2022. – Vol. 22, № 4. – P. 79–91 (SJR – 0.215).
4. Хачатрян, Н.К. Снижение размерности в задаче оптимального управления парком грузовых вагонов с использованием беспилотных локомотивов / Ф.А. Белоусов, Н.К. Хачатрян, И.В. Неволин // *Бизнес-информатика*. – 2022. – Т. 16, № 2. – С. 7–20 (SJR – 0.225).
5. Khachatryan, N. Modeling the process of cargo transportation between node stations / N. Khachatryan // *International Journal of Applied Mathematics*. – 2021. – Vol. 34, № 6. – P. 1223–1235 (SJR – 0.3).
6. Хачатрян, Н.К. Исследование динамики потока в модели организации грузоперевозок по круговой цепочке станций / Н.К. Хачатрян, Л.А. Бекларян // *Экономика и математические методы*. – 2021. – Т. 57, № 1. – С. 83–91 (ИФ РИНЦ – 1.418).
7. Khachatryan, N. Influence Assessment of Intelligent Unmanned Ground Vehicles on the Transport Network State / A. Akopov, N. Khachatryan, F. Belousov // *Advances in Systems Science and Applications*. – 2020. – Vol. 20, № 2. – P. 44–55 (SJR – 0.215).
8. Khachatryan, N. Study of flow dynamics in the model of cargo transportation organization between node stations / N. Khachatryan // *International Journal of Applied Mathematics*. – 2020. – Vol. 33, № 5. – P. 937–949 (SJR – 0.3).

9. Хачатрян, Н.К. Моделирование и оптимизация планов грузовых железнодорожных перевозок, выполняемых транспортным оператором / Ф.А. Белоусов, И.В. Неволин, Н.К. Хачатрян // Бизнес-информатика. – 2020. – Т. 14, № 2. – С. 21–35 (SJR – 0.225).
10. Khachatryan, N. Model for organization cargo transportation at resource restrictions / L. Beklaryan, N. Khachatryan, A. Akopov // International Journal of Applied Mathematics – 2019. – Vol. 32, № 4. – P. 627–640 (SJR – 0.3).
11. Хачатрян, Н.К. Динамические модели организации грузопотока на железнодорожном транспорте / Л.А. Бекларян, Н.К. Хачатрян // Экономика и математические методы. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 62–73 (ИФ РИНЦ – 1.418).
12. Хачатрян, Н.К. Исследование динамики емкостей перегонов в модели организации грузоперевозок между двумя узловыми станциями / Н.К. Хачатрян, Г.Л. Бекларян, С.В. Борисова, Ф.А. Белоусов // Бизнес-информатика. – 2019. – Т. 13, № 1. – С. 59–70 (SJR – 0.225).
13. Khachatryan, N. About quasi-solutions of traveling wave type in models for organizing cargo transportation / N. Khachatryan, A. Akopov, F. Belousov // Business Informatics. – 2018. – № 1. – P. 61–70 (SJR – 0.225).
14. Khachatryan, N. Model for organizing cargo transportation with an initial station of departure and a final station of cargo distribution / N. Khachatryan, A. Akopov // Business Informatics. – 2017. – № 1. – P. 25–35 (SJR – 0.225).
15. Хачатрян, Н.К. Динамическая модель организации грузоперевозок при ограниченности емкостей перегонных путей / Н.К. Хачатрян // Бизнес-Информатика. – 2013. – № 4. – С. 62–68 (SJR – 0.225).
16. Хачатрян, Н.К. Об одном классе динамических моделей грузоперевозок / Л.А. Бекларян, Н.К. Хачатрян // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2013. – Т. 53, № 10. – С. 1649–1667 (SJR – 0.496).
17. Хачатрян, Н.К. О решениях типа бегущей волны в одной транспортной модели / Н.К. Хачатрян // Автоматика и телемеханика. – 2003 – № 3. – С. 137–149 (SJR – 0.341).

***Работы, опубликованные в изданиях Дополнительного списка рецензируемых научных изданий из перечня, рекомендованного Минобрнауки России, в котором***

*могут быть опубликованы научные результаты диссертаций, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ:*

18. Хачатрян, Н.К. Динамическая модель организации грузоперевозок по замкнутой цепочке станций / Л.А. Бекларян, Н.К. Хачатрян // Аудит и финансовый анализ. – 2014. – № 5. – С. 80–83 (ИФ РИНЦ – 0.250).
19. Хачатрян, Н.К. О некоторых динамических моделях транспортных перевозок / Н.К. Хачатрян // Аудит и финансовый анализ. – 2003. – № 3. – С. 191–194 (ИФ РИНЦ – 0.250).

***Прочие публикации по теме диссертации:***

20. Хачатрян, Н.К. Основные проблемы железнодорожного транспорта России и пути их решения / Н. К. Хачатрян // Вестник ЦЭМИ – 2024. – № 1.
21. Хачатрян, Н.К. Обзор динамических моделей организации грузоперевозок, основанных на взаимодействии соседних станций / Н.К. Хачатрян // Вестник ЦЭМИ. – 2021. – № 3–4.
22. Хачатрян, Н.К. Модель организации грузоперевозок с учетом случайных воздействий / Н.К. Хачатрян // Вестник ЦЭМИ. – 2020. – № 3.
23. Хачатрян, Н.К. Динамическая модель организации грузоперевозок с возрастающей нагрузкой на узловые станции / Н. К. Хачатрян // Вестник ЦЭМИ. – 2018. – № 4.
24. Хачатрян, Н.К. Динамические модели грузоперевозок / Н.К. Хачатрян // Вестник ЦЭМИ. – 2018. – № 2.
25. Хачатрян, Н.К. Динамическая модель организации грузоперевозок / Л.А. Бекларян, Н. К. Хачатрян // Машинное обучение и анализ данных. – 2015. – Т. 1, № 13. – С. 1815–1826.
26. Khachatryan, N.K. Traveling wave type solutions in dynamic transport models / L.A. Beklaryan, N.K. Khachatryan // Functional differential equations. – 2006. – Vol. 13, № 2. – P. 125–155.