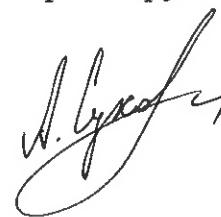


На правах рукописи



**Сухов Андрей Александрович**

**РАЦИОНАЛЬНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ  
РАЗМЕЩЕНИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

2.9.4 – Управление процессами перевозок (технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАУ ВО РУТ (МИИТ)).

**Научный руководитель** – профессор, доктор технических наук,  
Бородин Андрей Федорович

**Официальные оппоненты:**

Ададулов Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор – АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»), заместитель генерального директора

Костенко Владимир Васильевич, кандидат технических наук, доцент – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО ПГУПС), доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы»

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СамГУПС)

Защита диссертации состоится «27» мая 2022 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 44.2.008.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС) по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, аудитория Б2-15 – зал диссертационного совета.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат диссертации разослан «26» марта 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



Тимухина  
Елена Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** К восстановительным поездам (ВП) относятся специальные формирования, предназначенные для ликвидации последствий сходов с рельсов подвижного состава, а также оказания помощи в пределах своих технических возможностей при ликвидации последствий происшествий природного и техногенного характера. Они являются важнейшим элементом системы обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте.

Схема расположения восстановительных средств на сети является, в основном, результатом исторического развития железных дорог. Восстановительные поезда, как правило, размещались в крупных железнодорожных узлах, в которых находились резервы тяговых ресурсов. Кроме того, требовалось достаточное путевое развитие и техническое оснащение станций, которое позволяло как можно быстрее собрать и отправить восстановительный поезд к месту выполнения работ по ликвидации последствий транспортного происшествия.

Любое транспортное происшествие приводит к образованию барьерного места и снижению пропускной способности участка, что существенно осложняет эксплуатационную работу. Под барьерным местом в диссертационном исследовании понимается элемент инфраструктуры, технические возможности которого существенно снижены в результате транспортных происшествий и чрезвычайных ситуаций.

Особенностью транспортного происшествия является то, что место и время его возникновения заранее неизвестны. В ряде случаев причиной возникновения транспортного происшествия может быть человеческий фактор, погодные условия и техническое состояние элементов транспортной инфраструктуры и подвижного состава, характер влияния которых в определенное время невозможно предугадать.

При возникновении чрезвычайной ситуации или транспортного происшествия большое значение имеет срок, в течение которого будут устранены его последствия. Особенно это важно на линиях первого и второго классов, где необходимо обеспечить восстановление наличной пропускной способности в кратчайшие сроки. Любые перерывы в движении чреваты задержками как пассажирских дальних и пригородных, так и грузовых поездов различных категорий, что приводит к потенциальным убыткам.

Очевидно, что последствия транспортного происшествия должны быть ликвидированы в кратчайший срок для скорейшей нормализации эксплуатационной работы. Технологическое время выполнения восстановительных работ определяется установленными нормативами, а время их начала и окончания зависит от времени доставки восстановительного поезда к месту выполнения работ. Необходимо разработать схему размещения восстановительных поездов, обеспечивающую минимальное время на

ликвидацию последствий транспортных происшествий, и чтобы при этом она была экономически обоснованной и эффективной.

**Степень разработанности темы исследования.** Научной основой диссертационного исследования являются труды в области эксплуатации железнодорожного транспорта, в том числе:

в области функционирования железнодорожного транспорта в условиях чрезвычайных ситуаций, разработки систем и способов повышения безопасности транспорта – В.М. Пономарева, Б.Н. Рахманова, А.И. Шевченко, А.Н. Цурикова, Н.К. Домницкого, А.Н. Гуды, О.И. Веревкиной;

в области диспетчерского управления при эксплуатационных затруднениях – Г.М. Грошева, В.А. Кудрявцева, А.К. Угрюмова, А.Д. Чернюгова, И.И. Зубкова, Г.А. Платонова, А.П. Романова;

в области прогнозирования поездной ситуации и регулировочных мер, предпринимаемыми дежурно-диспетчерским – В.С. Климанова, Б.Д. Никифорова, Е.М. Тишкина, В.М. Макарова, П.О. Новикова, П.С. Холодняка;

в области влияния избыточного вагонного парка на работу участков – А.Ф. Бородина, Е.А. Сотникова, Р.Ф. Сайбаталова;

в области надежности технических средств и инфраструктурных элементов – П.С. Грунтова, В.И. Некрашевича, А.Т. Осьминина, М.А. Осьминина, Е.А. Сотникова, Е.Н. Тимухиной, А.П. Бадецкого, Э.В. Бакумова, Н.Е. Окулова, Э.Ю. Тимохина, А.Д. Чернюгова, Б.Д. Воскресенского, Т.Н. Родькиной, Ю.Н. Рудаковой.

**Областью исследования** являются планирование, организация и управление транспортными потоками; технология транспортных процессов.

**Объектами исследования** является транспортная сеть, транспортные потоки.

**Предметом исследования** являются критерии и параметры размещения восстановительных поездов.

**Целью исследования** является разработка научно-методических решений по обоснованию размещения восстановительных средств на сети железных дорог, а также выявление факторов, позволяющих разработать схему размещения восстановительных поездов, обеспечивающую ликвидацию последствий транспортных происшествий при снижении затрат времени и денежных средств.

**Задачами диссертационного исследования** являются:

анализ актуального состояния системы функционирования и размещения восстановительных средств на сети железных дорог ОАО «РЖД»;

создание математической модели, позволяющей провести исследование влияния транспортного происшествия на работу структурных подразделений железных дорог;

выявление рациональных параметров размещения восстановительных средств, на основе которых будет произведена актуализация схемы.

**Научная новизна исследования** заключается в разработке нового научно обоснованного подхода к определению рациональных эксплуатационных параметров размещения восстановительных средств на сети железных дорог,

базирующегося на прогнозировании динамики развития и устранения барьерных мест и обеспечивающего реализацию эффективных мер регулирования эксплуатационной работы при минимальных затратах, для чего:

разработана математическая модель системной динамики развития и устранения затруднений в эксплуатационной работе железных дорог при возникновении транспортных происшествий и ликвидации их последствий;

предложена методика расчета затрат, связанных с задержками единиц транспортного потока на полигоне возникновения транспортного происшествия на основе имитационного моделирования его работы;

обоснована формализованная постановка задачи эффективного размещения восстановительных средств железных дорог;

разработан алгоритм эвристического поиска решения задачи выбора эффективной схемы размещения восстановительных средств железных дорог на сетевой потоковой модели, предусматривающий последовательное увеличение количества восстановительных поездов с одновременным поэтапным уменьшением множества конкурентоспособных вариантов их размещения.

**Теоретическая и практическая значимость исследования** заключается в возможности использования результатов в деятельности структурных подразделений железнодорожного транспорта. Имитационное моделирование процесса ликвидации последствий транспортного происшествия позволяет детально оценить его влияние на поездную ситуацию на железнодорожных линиях и направлениях. Предлагаемый в диссертационном исследовании алгоритм выбора эффективной схемы размещения восстановительных средств на основе установленных критериев размещения позволит минимизировать суммарные затраты, связанные с содержанием восстановительных средств, и потери, вызываемые перерывами в движении поездов в случаях возникновения транспортных происшествий.

Разработанный в диссертационной работе математический аппарат позволяет выполнить сравнительный анализ различных схем возможной дислокации восстановительных средств на сети железных дорог ОАО «РЖД» и научно обосновать выбор наиболее рациональной из них с определением заданных параметров оценки ее эффективности. Сформулированные в работе параметры организации работы аварийно-восстановительных средств на сети железных дорог ОАО «РЖД» позволяют определить требуемое количество восстановительных поездов и установить оптимальные места их дислокации, при которых будет получен наибольший полезный эффект от уменьшения общего времени ликвидации последствий транспортных происшествий при минимальных затратах на содержание инфраструктуры и персонала восстановительных поездов.

**Методы исследования.** В диссертационной работе с использованием методов математического анализа, теории вероятностей и математической статистики выполнена обработка собранных статистических данных о результатах деятельности аварийно-восстановительных средств на сети российских железных дорог в различные периоды времени.

Анализ поездной ситуации на различных этапах ликвидации барьерных мест, динамики изменения количества единиц транспортного потока, а также определение затрат, вызываемых вынужденным простоем поездов различных категорий во время выполнения аварийно-восстановительных работ выполнен с использованием методов имитационного моделирования.

В основу алгоритма выбора эффективной схемы размещения восстановительных средств на направлениях железнодорожной сети заложены методы теории графов. В процессе апробации алгоритма на полигонах железных дорог использовались методы технико-экономического сопоставления вариантов.

#### **Положения диссертации, выносимые на защиту:**

модель системной динамики развития поездной ситуации, включающая в себя четыре периода изменения эксплуатационной обстановки: с момента возникновения транспортного происшествия до момента прибытия восстановительного поезда; с момента прибытия восстановительного поезда и до момента частичного восстановления пропускной способности; с момента частичного восстановления пропускной способности до момента восстановления исходных инфраструктурных возможностей; с момента восстановления перевозочных мощностей до момента нормализации поездной обстановки с учетом инерционности накопления единиц транспортного потока на путях станций;

технология имитационных расчетов по выбору эффективных способов организации движения при возникновении транспортных происшествий и в период производства восстановительных работ с учетом регулировочных мер, предпринимаемых управленческим персоналом в структурных подразделениях железных дорог;

структура и порядок вычисления натуральных и стоимостных показателей, инфраструктурных и ресурсных ограничений, учитываемых при оценке вариантов размещения восстановительных поездов и зон их обслуживания;

эвристический алгоритм выбора эффективной схемы размещения восстановительных поездов на железнодорожных направлениях, обладающих различной инфраструктурной и технической оснащенностью, предусматривающий учет таких характеристик направления, как размеры движения поездов различных категорий, протяженность участков.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационного исследования реализованы в научно-исследовательской работе «Актуализация схемы размещения восстановительных поездов с учетом специализации и классификации железнодорожных линий в соответствии с методикой, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 23 декабря 2015 г. №3048Р», по итогам которой было разработано распоряжение «Об утверждении мест дислокации восстановительных поездов на инфраструктуре ОАО «РЖД» №2631р от 18 декабря 2017 г.

**Достоверность и обоснованность научных положений и выводов** подтверждается использованием в экспериментальных расчетах проверяемых данных из информационных ресурсов ОАО «РЖД»; согласованностью научных

положений с современным уровнем развития теории управления перевозочным процессом; использованием сравнения авторских данных и результатов с результатами, полученными ранее по рассматриваемой тематике; корректным применением выбранного математического аппарата.

Для повышения точности расчетов и получения достоверных результатов выполнена проверка основных рассчитанных параметров путем сопоставления с данными, полученными в эксплуатационных условиях. В исследовании использованы методы построения сетевых потоковых моделей с включением в них параметров, полученных путем имитационного моделирования.

**Апробация работы.** Положения диссертации докладывались на заседаниях кафедры «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)), а также на шести международных научно-практических конференциях:

11-й международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD' 2018), Россия, Москва, ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, 1–3 октября 2018 г.;

12-й международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD' 2019), Россия, Москва, ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, 1–3 октября 2019 г.;

Восьмой научно-практической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019)», Россия, Москва, 21 ноября 2019 г.;

IX-й международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте», Беларусь, Гомель, БелГУТ, 26 – 27 ноября 2020 г.;

Международной научно-практической конференции «Тихомировские чтения: синергия технологии перевозочного процесса», Беларусь, Гомель, БелГУТ, 10-11 декабря 2020 г.;

Международной научно-практической конференции «Фёдор Петрович Кочнев – выдающийся организатор транспортного образования и науки в России», Россия, Москва, РУТ (МИИТ), 22-23 апреля 2021 г.

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы и научные результаты опубликованы в 11 печатных работах, в том числе: 2 статьи опубликованы в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, 2 статьи – в периодических изданиях, индексируемых единой международной базой научных материалов Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертационное исследование изложено на 141 странице, включает 56 иллюстраций, 32 таблицы. Диссертация включает в себя введение, 4 главы, заключение, список литературы (85 наименований), 4 приложения.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, определена теоретическая и практическая значимость исследования, поставлены задачи предложены основные результаты исследования.

**В первой главе** выполнен анализ динамики изменения основных показателей деятельности восстановительных поездов за период 2004 – 2019 гг., приведена оценка современного состояния системы восстановительных средств на инфраструктуре ОАО «РЖД». Для доказательства взаимосвязи количества случаев нарушения безопасности движения в хозяйстве перевозок и интенсивности движения поездов рассмотрены случаи нарушения безопасности движения в хозяйстве перевозок за период 2010 – 2016 гг.

Организация работы восстановительных поездов строго регламентирована, поэтому при выполнении диссертационной работы были изучены нормативные документы и распоряжения ОАО «РЖД» по вопросам основных и неосновных показателей производственной деятельности, технического оснащения восстановительных поездов.

Анализ трудов ряда ученых в сфере железнодорожной науки позволил оценить влияние временных затруднений на эксплуатационную обстановку на железнодорожных участках и полигонах и проанализировать действие регулировочных мероприятий, направленных на минимизацию последствий транспортных происшествий и последующую стабилизацию поездной ситуации после завершения восстановительных работ.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:  
анализ актуального состояния системы функционирования и размещения восстановительных средств на сети железных дорог ОАО «РЖД»;

создание математической модели, позволяющей провести исследование влияния транспортного происшествия на работу структурных подразделений железных дорог;

выявление рациональных параметров размещения восстановительных средств, на основе которых будет произведена актуализация схемы.

Формализованное описание структуры задач исследования выражается следующим образом.

Полигон железнодорожной сети описывается связным графом  $G(X, Y)$ , который состоит из  $X$  узлов, соединяемых  $Y$  железнодорожными участками. В узлах и на ребрах графа  $G(X, Y)$  по годам расчетного периода  $t = 1, 2, \dots, T$  лет заданы:

результатирующие пропускные способности участков и узлов

$$\mathbf{n}^*_t = \{\mathbf{n}^*_{X(t)}; \mathbf{n}^*_{Y(t)}\}; \quad (1)$$

емкости путевого развития станций в узлах и на участках

$$\mathbf{W}^*_t = \{\mathbf{W}^*_{X(t)}; \mathbf{W}^*_{Y(t)}\}; \quad (2)$$

размеры движения пассажирских и грузовых поездов всех категорий по участкам



$$\mathbf{n}_t = \{ \mathbf{n}_{Y(t)}^{\text{пс}}; \mathbf{n}_{Y(t)}^{\text{гр}} \}; \quad (3)$$

признаки наличия в узлах смены локомотивов пассажирского и грузового движения (наборы двоичных переменных)

$$\mathbf{R}_t^{\text{лок}} = \{ \mathbf{R}_{X(t)}^{\text{лок.пс}}; \mathbf{R}_{X(t)}^{\text{лок.гр}} \}; \quad (4)$$

признаки наличия в узлах смены локомотивных бригад пассажирского и грузового движения (наборы двоичных переменных)

$$\mathbf{R}_t^{\text{лб}} = \{ \mathbf{R}_{X(t)}^{\text{лб.пс}}; \mathbf{R}_{X(t)}^{\text{лб.гр}} \}; \quad (5)$$

Требуется обосновать эффективное размещение восстановительных поездов, которое по годам расчетного периода характеризуют наборы двоичных переменных – признаки дислокации восстановительных поездов в узлах полигона  $\mathbf{R}_{X(t)}^{\text{вп}}$  и признаки прикрепления участков полигона к узлам дислокации восстановительных поездов  $\mathbf{R}_{X(t),Y(t)}^{\text{вп}}$

$$\mathbf{R}_t^{\text{вп}} = \{ \mathbf{R}_{X(t)}^{\text{вп}}; \mathbf{R}_{X(t),Y(t)}^{\text{вп}} \}; \quad (6)$$

Целевая функция задачи:

$$E = \sum_{t=1}^T E_t(\mathbf{R}_t^{\text{вп}}, \mathbf{n}_t, \mathbf{n}_t^*, \mathbf{W}_t^*, \mathbf{R}_t^{\text{лок}}, \mathbf{R}_t^{\text{лб}}) \rightarrow \min \quad (7)$$

Ограничения задачи:

на допустимые размеры движения поездов по участкам:

$$\mathbf{n}_{Y(t)}^{\text{пс}} \boldsymbol{\varepsilon}_{Y(t)}^{\text{пс}} + \mathbf{n}_{Y(t)}^{\text{гр}} \leq \mathbf{n}_{Y(t)}^*; \quad (8)$$

на допустимые размеры движения поездов по станциям:

$$\mathbf{n}_{X(t)}^{\text{пс}} + \mathbf{n}_{X(t)}^{\text{гр}} \leq \mathbf{n}_{X(t)}^*; \quad (9)$$

на допустимое наличие парка вагонов на участках и станциях

$$\mathbf{P}_t(\mathbf{R}_t^{\text{вп}}, \mathbf{n}_t, \mathbf{n}_t^*, \mathbf{R}_t^{\text{лок}}, \mathbf{R}_t^{\text{лб}}) \boldsymbol{\varphi} \leq \mathbf{W}_t^*; \quad (10)$$

на доступные тяговые ресурсы

$$\mathbf{M}_t(\mathbf{R}_t^{\text{вп}}, \mathbf{n}_t, \mathbf{n}_t^*, \mathbf{R}_t^{\text{лок}}, \mathbf{R}_t^{\text{лб}}) \leq \mathbf{M}_t^*; \quad (11)$$

на необходимый уровень надежности перевозочного процесса

$$\mathbf{H}_{\text{потр}}(\mathbf{R}_t^{\text{вп}}, \mathbf{n}_t, \mathbf{n}_t^*, \mathbf{W}_t^*, \mathbf{R}_t^{\text{лок}}, \mathbf{R}_t^{\text{лб}}) \geq \mathbf{H}^*. \quad (12)$$

При этом

$$\sum_{X=1}^{\bar{X}} \mathbf{R}_{X(t),Y(t)}^{\text{вп}} = 1 \quad \forall Y(t), \quad (13)$$

то есть каждый участок должен быть обязательно прикреплен к одному узлу дислокации восстановительного поезда.

**Во второй главе** диссертационного исследования разработана имитационная модель направления (рисунок 1), в основу технологии которой заложен процесс продвижения поездов по участкам направления. С ее помощью детально рассмотрена динамика накопления единиц транспортного потока на подразделении железнодорожной сети из-за образования «барьерного места».

Транспортное происшествие приводит к резкому снижению перевозочной мощности участков, что, в свою очередь, вызывает необходимость вынужденного простоя поездов.

Характер изменения и сложность поездной ситуации зависит от:

- масштаба влияния последствий транспортного происшествия на инфраструктурные возможности участка;
- наличных инфраструктурных возможностей рассматриваемого и смежных участков, их технического оснащения;
- размеров движения поездов на рассматриваемом и смежных участках.

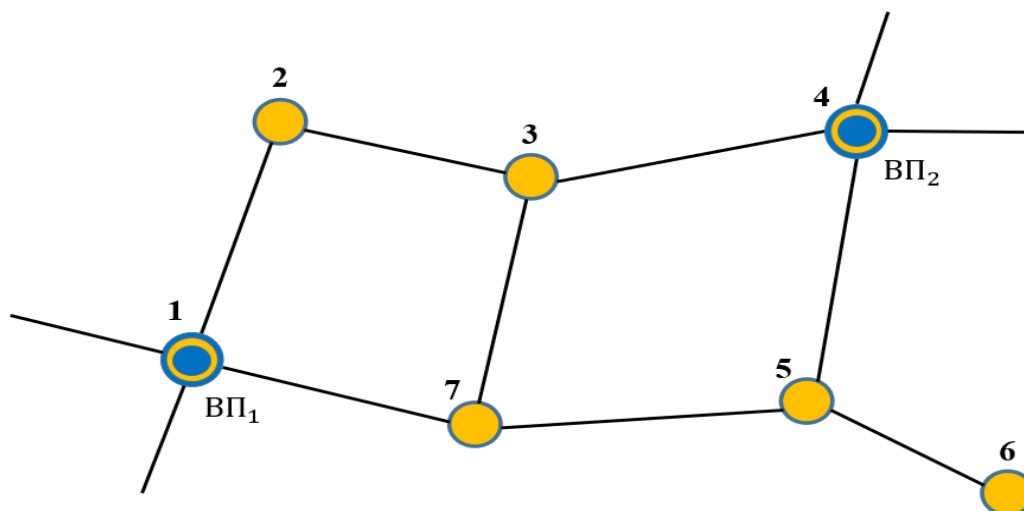


Рисунок 1 – Схема имитационной модели подразделения железнодорожной сети с размещенными на ней техническими станциями и восстановительными поездами

Размеры движения поездов существенно влияют на скорость заполнения участка поездами: если на участке отсутствуют инфраструктурные ограничения, а поступление поездов осуществляется согласно графику движения поездов, то количество транспортных единиц на участке практически не отклоняется от среднего значения. Если ограничения пропускной способности присутствуют, то количество поездов на участке постепенно увеличивается. Поезда отставляются от движения на путях промежуточных и технических станций, что впоследствии приводит к заполнению путей сортировочных парков.

Для ликвидации последствий транспортного происшествия, выполнения аварийно-восстановительных работ и открытия движения поездов на барьерное место отправляется восстановительный поезд.

В общем случае общее время  $T_{\text{пер}}$  полного и частичного перерыва движения определяется по формуле:

$$T_{\text{пер}} = \max \{t_{\text{прик.}} + t_{\text{отпр.}} + t_{\text{движ.}} + t_{\text{сн.напр.}}; t_{\text{подг.}}\} + t_{\text{работ.}} + t_{\text{инфр.}}, \text{ ч}, \quad (14)$$

где  $t_{\text{прик.}}$  – максимальное время, в течение которого должен быть передан приказ на подъем восстановительного поезда для устранения последствий транспортного происшествия или чрезвычайной ситуации, ч ;

$t_{\text{отпр.}}$  – максимальное время, в течение которого восстановительный поезд должен быть подготовлен и отправлен для устранения последствий транспортного происшествия, ч ;

$t_{\text{движ.}}$  – время движения восстановительного поезда к месту выполнения работ по ликвидации последствий транспортного происшествия или чрезвычайной ситуации, ч;

$t_{\text{сн.напр.}}$  – время, в течение которого происходит снятие напряжения контактной сети, ч;

$t_{\text{подг}}$  – время с момента получения информации о возникновении транспортного происшествия до момента готовности места транспортного происшествия к допуску восстановительных средств для начала аварийно-восстановительных работ, ч;

$t_{\text{работ.}}$  – среднее время выполнения работ по ликвидации последствий происшествия, ч., включающее в себя общее время на уборку единиц сошедшего подвижного состава и устранение препятствий для возобновления движения, определяется тяжестью последствий и напрямую зависит от количества сошедших с путей единиц подвижного состава, ч;

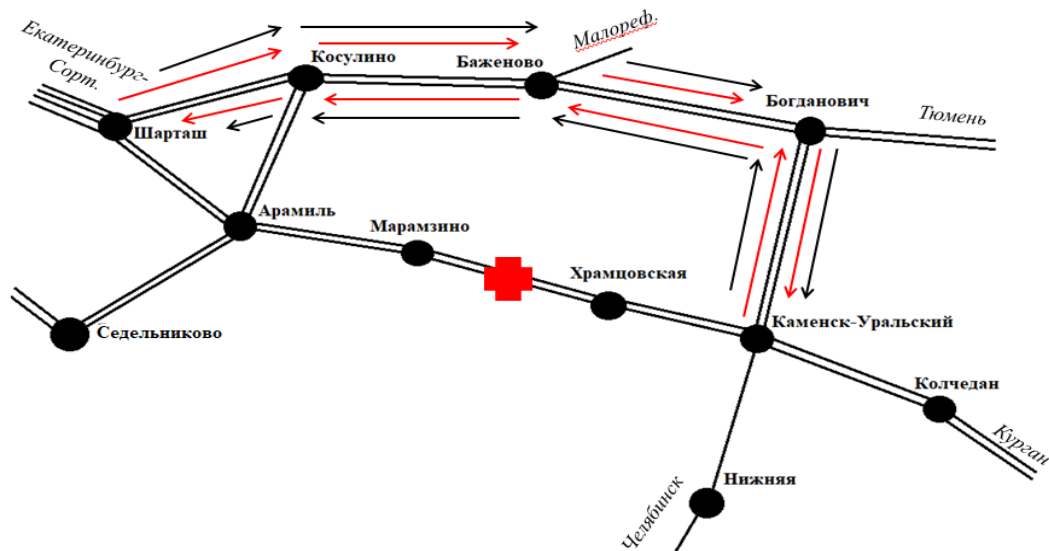
$t_{\text{инфр.}}$  – среднее время выполнения работ по восстановлению инфраструктуры (в части, которая не может выполняться параллельно с ведением работ, входящих в величину  $t_{\text{работ.}}$ ), ч.

При длительном времени устранения барьерного места, эксплуатационные затруднения могут затронуть не только работу смежных участков, но и эксплуатационную работу направлений. Для нормализации поездной ситуации дежурно-диспетчерский персонал проводит регулирующие управленческие мероприятия, основанные на исходных инфраструктурных и ресурсных возможностях.

В диссертационной работе рассмотрены случаи нарушения безопасности движения на участках Свердловской, Московской, Октябрьской и Забайкальской железных дорог на предмет развития поездной ситуации и применения регулировочных мероприятий дежурно-диспетчерским персоналом (рисунок 2).

Для ряда случаев проанализирована и построена динамика накопления вагонов на направлении, и выявлена инерционность процесса накопления единиц транспортного потока из-за перераспределения тяговых ресурсов (рисунок 3).

Для приближения технологического процесса работы имитационной модели к реальным условиям функционирования структурных подразделений количество локомотивов в ней было скорректировано, а в случае продолжительного простоя имитировались их отцепка от «бросаемого» поезда и следование локомотивов к пунктам их оборота. Это позволило воспроизвести в имитационной модели инерционность накопления поездов после восстановления наличной пропускной способности направления.



Условные обозначения:

- направление движения пассажирских поездов на Екатеринбург-Сорт. и на Каменск-Уральский в обход барьерного места
- направление движения грузовых поездов на Екатеринбург-Сорт. и на Каменск-Уральский в обход барьерного места

Рисунок 2 – Схема полигона Свердловской железной дороги с указанием барьерного места на перегоне Храмцовская – Марамзино (Свердловская железная дорога)

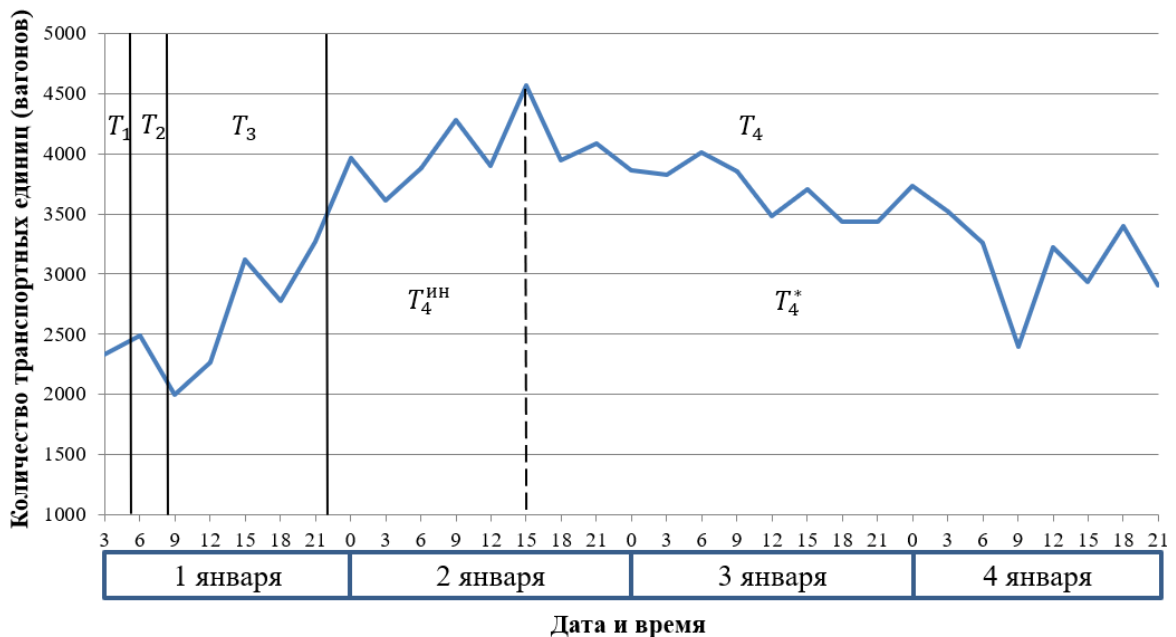


Рисунок 3 – Динамика наличия вагонов на рассматриваемом полигоне Свердловской железной дороги

Спроектированная модель позволила оценить эффективность применяемых дежурно-диспетчерским персоналом регулировочных мер, таких как:

отстановка поездов от движения на свободных приемо-отправочных путях промежуточных и технических станций (для рационального подвода поездов к ограничивающему и смежным участкам);

формирование сдвоенных поездов (для форсированного использования пропускной способности);

организация продвижения поездов в обход барьерного места (для снижения темпов накопления поездов на подходах к участку с инфраструктурными ограничениями за счет использования резервов пропускной способности других участков направления);

одностороннее продвижение поездов по двум параллельным путям (для временного увеличения наличной пропускной способности в одном из направлений);

колебательное движение поездов на однопутном участке (для форсированного использования пропускной способности с помощью пакетов поездов).

**В третьей главе** диссертационного исследования рассматривается взаимосвязь факторов, влияющих на выбор станций постоянной дислокации восстановительных поездов.

Выбор необходимого и достаточного количества восстановительных поездов и схема их расположения определяется критерием оптимальности  $E$ .

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \rightarrow \min, \quad (15)$$

где  $E_1$  – суммарные затраты на доставку восстановительных поездов к местам аварийно-восстановительных работ, руб.;

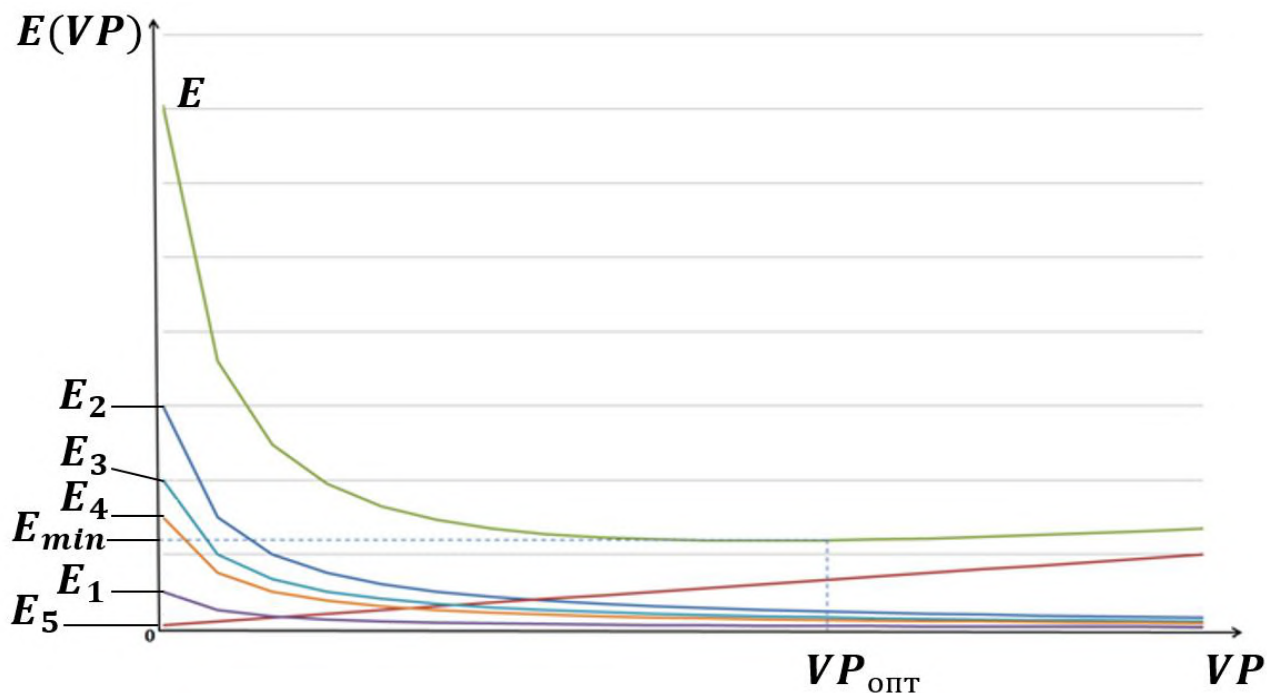
$E_2$  – суммарные затраты от вынужденного простоя поездов различных категорий вследствие образования барьерного места, руб.;

$E_3$  – затраты, связанные с невозможностью использования путевого развития промежуточных станций из-за отстоя брошенных поездов и занятостью путей участков, технических станций в ожидании отправления сформированных поездов, руб.;

$E_4$  – затраты на организацию движения поездов в обход барьерного места, руб.;

$E_5$  – суммарные затраты на содержание восстановительных поездов, руб.

Критерий оптимальности  $E$  является целевой функцией, зависящей от количества восстановительных поездов  $VP$  и выбора схемы их размещения, и в общем виде выражается формулой (16). График функции  $E(VP)$  представлен на рисунке 4.

Рисунок 4 – График функции  $E(VP)$ 

$$E(VP) = \frac{e_1}{VP} c_1 + \frac{e_2}{VP} c_2 + e_3 c_3 + e_4 c_4 + e_5 c_5 VP, \quad (16)$$

$$VP \leq VP^*, \quad (17)$$

$$VP > 0 \quad (18)$$

$$0 \leq a_{\text{рез}} \leq 1, \quad (19)$$

$$n_{\text{гр}} + n_{\text{пасс}} \varepsilon_{\text{пасс}} \leq n_{\text{гр}}^*, \quad (20)$$

$$P_{\text{уч.}} + P_{\text{ст.}} \leq W^*, \quad (21)$$

где  $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5$  – переменные, характеризующие соответствующие составляющие критерия оптимальности  $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$ ;

$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  – стоимостные оценки, связанные с переменными  $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5$ , соответственно;

$VP^*$  – предельное количество станций, подходящих для дислокации восстановительных поездов;

$a_{\text{рез}}$  – коэффициент, учитывающий рациональное использование и перераспределение тяговых ресурсов в результате действий дежурно-диспетчерского персонала. Вычисляется как отношение количества работоспособных резервных локомотивов к общему количеству локомотивов, используемых в грузовом движении;

$n_{\text{гр}}$  – размеры движения грузовых поездов согласно нормативному графику движения поездов, пар поездов/сут.;

$n_{\text{пасс}}$  – размеры движения пассажирских поездов согласно нормативному графику движения поездов, пар поездов/сут.;

$\varepsilon_{\text{пасс}}$  – коэффициент съема пассажирских поездов;

$n_{\text{гр}}^*$  – максимальные размеры движения грузовых поездов, пар поездов/сут.;

$P_{\text{уч.}}$  – рабочий парк грузовых вагонов в поездах на участках, вагонов;

$P_{ст.}$  — рабочий парк грузовых вагонов на станциях, вагонов;

$W^*$  — максимально допустимое заполнение емкости путевого развития, вагонов.

Затраты на доставку восстановительного поезда определяются по формуле:

$$E_1 = \left( m_{восст.} c_{ваг.} + c_{лок.} + \frac{c_{бр.}}{v} + \frac{M_{топл.}}{100} c_{топл.} \right) S, \quad (22)$$

где  $m_{восст.}$  — количество вагонов в составе восстановительного поезда;

$c_{ваг.}$  — стоимость 1 вагоно-км вагонов, курсирующих в хозяйственном движении, руб.;

$c_{лок.}$  — стоимость 1 локомотиво-км локомотивов, работающих в хозяйственном движении, руб.;

$c_{бр.}$  — стоимость бригадо-часа локомотивной бригады при работе на тепловозе (электровозе) в хозяйственном движении, руб.;

$v$  — средняя скорость продвижения восстановительного поезда к месту аварийно-восстановительных работ, км/ч;

$M_{топл.}$  — масса условного топлива, необходимая для продвижения поезда на 100 км, кг;

$c_{топл.}$  — стоимость килограмма условного топлива на тягу поездов в хозяйственном движении, руб.;

$S$  — расстояние между местом дислокации и местом аварийно-восстановительных работ, км.

Суммарные затраты от вынужденного простоя поездов различных категорий  $E_2$  определяются по формуле:

$$E_2 = E_2^{гр.} + E_2^{пасс.} + E_2^{приг.}, \quad (23)$$

где  $E_2^{гр.}$ ,  $E_2^{пасс.}$ ,  $E_2^{приг.}$  — затраты от вынужденного простоя, соответственно, грузовых, пассажирских, пригородных поездов, руб.

Чтобы определить затраты от вынужденного простоя грузовых поездов  $E_2^{гр.}$ , необходимо рассматривать график динамики накопления вагонов на полигоне как функцию  $P(t)$ , которая меняет свое поведение на различных этапах устранения барьерного места (см. рисунок 5). Общая величина затрат от вынужденного простоя поездов рассчитывается по формуле:

$$E_2^{гр.} = c_{гр.} \sum_{i=1}^I \int_{t_i}^{t_{i+1}} P(t) dt, \quad (24)$$

где  $c_{гр.}$  — оценка удельных расходов, зависящих от простоя грузовых поездов, руб./вагоно-ч;

$i = 1, \dots, I$  — порядковый номер периода аварийно-восстановительных работ;

$t_i$  — момент начала периода  $i$  аварийно-восстановительных работ;

$t_{i+1}$  — момент окончания периода  $i$  аварийно-восстановительных работ.

Если рассматривать процесс накопления единиц транспортного потока как непрерывную линейную функцию, зависящую от размеров равномерно поступающих на участок поездопотоков и установленных на определенных этапах аварийно-восстановительных работ значений пропускной способности участка, то график функции  $P(t)$  принимает вид, представленный на рисунке 5. Площадь фигуры под графиком функции  $P(t)$  представляет собой сумму вагоно-часов простоя вагонов в составе поездов, находящихся на рассматриваемом

участке и поступающих на него в течение всего периода аварийно-восстановительных работ.

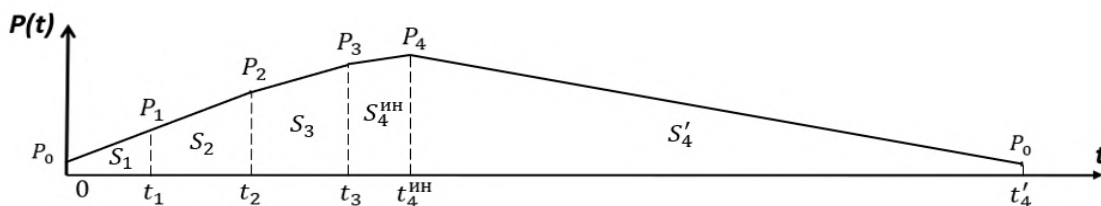


Рисунок 5 – График зависимости количества вагонов на участке от времени ( $P(t)$ )

Пропускная способность проблемного участка в течение периодов  $T_1$  и  $T_2$  (промежуток времени от 0 до  $t_2$ ) остается минимальной, поэтому количество вагоно-часов за этот период определяется по формуле:

$$S_1 + S_2 = \int_0^{t_2} \left( P_0 + \frac{(2n_{гр.}^{норм} - 2n_1 - n_{гр.}^{откл(1,2)}) m_{гр.} t}{24} \right) dt, \quad (25)$$

где  $n_{гр.}^{норм}$  — нормативные размеры движения грузовых поездов, пар поездов/сут;  
 $m_{гр.}$  — среднее количество вагонов в составах грузовых поездов, ваг.;  
 $n_{гр.}^{откл(1,2)}$  — размеры движения грузовых поездов, отклоняемых на кружные направления в периодах  $T_1$  и  $T_2$ , поездов/сут.

В момент времени  $t_2$  часть перевозочных мощностей проблемного участка восстанавливается до значения  $n_2$ , что приводит к изменению поведения графика  $P(t)$  в течение периода  $T_3$ .

$$S_3 = \int_{t_2}^{t_3} \left( P_2 + \frac{(2n_{гр.}^{норм} - 2n_2 - n_{гр.}^{откл(3)}) m_{гр.} t}{24} \right) dt, \quad (26)$$

где  $n_{гр.}^{откл(3)}$  — размеры движения грузовых поездов, отклоняемых на кружные направления в периоде  $T_3$ , поездов/сут.

Пропускная способность восстанавливается до исходного значения  $n_0$  в момент времени  $t_3$ , однако вновь доступные резервы пропускной способности полноценно начинают использоваться только по итогам периода  $T_4^{ин}$ . Таким образом,  $S_4^{ин}$  определяется по формуле:

$$S_4^{ин} = \int_{t_3}^{t_4^{ин}} \left( P_3 + \frac{[2n_{гр.}^{норм} - 2n_0(1 - a_{рез})] m_{гр.} t}{24} \right) dt, \quad (27)$$

После выбора оптимального варианта восстановления движения брошенных поездов количество единиц транспортного потока возвращается к исходному значению  $P_0$  в конце периода  $T_4'$  за счет доступных резервов наличной пропускной способности участка.

$$S_4' = \int_{t_4^{ин}}^{t_4'} \left( P_4 - \frac{(2n_0 - 2n_{гр.}^{норм}) m_{гр.} t}{24} \right) dt \quad (28)$$

Составляющие формул  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  определяются математически за счет использования функций, построенных на основе данных об исходной пропускной способности, уменьшенной пропускной способности и количестве отклоненных поездов, при этом в качестве аргументов выступают соответствующие величинам  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  значения времени.



В случае, когда вынужденный простой пассажирских и пригородных поездов обусловлен поездной ситуацией, затраты от вынужденного простоя определяются таким же образом, что и для грузовых поездов.

$$E_2^{\text{пасс.}} = c_{\text{пасс.}} \sum_{i=1}^I \int_{t_i}^{t_{i+1}} P(t) dt, \quad (29)$$

где  $c_{\text{пасс.}}$  — оценка удельных расходов, зависящих от простоя пассажирских поездов, руб./вагоно-ч;

$$E_2^{\text{приг.}} = c_{\text{приг.}} \sum_{i=1}^I \int_{t_i}^{t_{i+1}} P(t) dt, \quad (30)$$

где  $c_{\text{приг.}}$  — оценка удельных расходов, зависящих от простоя пригородных поездов, руб./вагоно-ч;

Составляющие  $E_3$  и  $E_4$  обретают актуальность при продолжительных перерывах в движении поездов и являются взаимосвязанными.

$$E_3^{\text{гр.}} = n_{\text{гр.}}^{\text{задерж.}} c_{\text{зан.}} T_{\text{пер}}, \quad (31)$$

$$E_4^{\text{гр.}} = n_{\text{гр.}}^{\text{откл.}} \Delta C_{\text{гр.}}, \quad (32)$$

где  $n_{\text{гр.}}^{\text{задерж.}}$  — количество задержанных грузовых поездов, поездов;

$c_{\text{зан.}}$  — стоимость 1 часа занятия 1 км станционных путей промежуточных, участковых и сортировочных станций задержанными грузовыми поездами, руб./км;

$\Delta C_{\text{гр.}}$  — дополнительные затраты, связанные с организацией продвижения грузовых поездов в обход барьерного места, руб.

Дополнительные затраты  $\Delta C_{\text{гр.}}$  определяются по формуле:

$$\Delta C_{\text{гр.}} = E_{\text{гр.}}^{\text{откл.}} - E_{\text{гр.}}^{\text{уст.}}, \quad (33)$$

где  $E_{\text{гр.}}^{\text{откл.}}$  — затраты от продвижения грузовых поездов в обход барьерного места альтернативным маршрутом, руб.

$E_{\text{гр.}}^{\text{уст.}}$  — затраты от продвижения грузовых поездов по установленному графиком движения поездов и планом формирования маршруту следования, руб.

$$E_{\text{гр.}}^{\text{откл.}} = n_{\text{гр.}}^{\text{откл.}} E_{\text{гр. гр.}}^{\text{откл.}} \gamma_{\text{гр. гр.}} m + n_{\text{гр.}}^{\text{откл.}} E_{\text{гр. пор.}}^{\text{откл.}} (1 - \gamma_{\text{гр. гр.}}) m, \quad (34)$$

$$E_{\text{гр.}}^{\text{уст.}} = n_{\text{гр.}}^{\text{откл.}} E_{\text{гр. гр.}}^{\text{уст.}} \gamma_{\text{гр. гр.}} m + n_{\text{гр.}}^{\text{откл.}} E_{\text{гр. пор.}}^{\text{уст.}} (1 - \gamma_{\text{гр. гр.}}) m, \quad (35)$$

где  $E_{\text{гр. гр.}}^{\text{откл.}}$ ,  $E_{\text{гр. гр.}}^{\text{уст.}}$  — суммарные стоимостные оценки на один груженный вагон, соответственно, отклоненный от основного маршрута следования и следующий по основному маршруту следования грузовых поездов установленной массы, руб./ваг.;

$E_{\text{гр. пор.}}^{\text{откл.}}$ ,  $E_{\text{гр. пор.}}^{\text{уст.}}$  — суммарные стоимостные оценки на один порожний вагон, соответственно, отклоненный от основного маршрута следования и следующий по основному маршруту следования грузовых поездов установленной массы руб./ваг.;

$\gamma_{\text{гр. гр.}}$  — доля груженных вагонов в составе грузовых поездов.

В общем случае затраты от вынужденного простоя пассажирских и пригородных поездов определяются таким же образом, что и для грузовых поездов.

$$E_2^{\text{пасс.}} = c_{\text{пасс.}} \sum_{i=1}^I \int_{t_i}^{t_{i+1}} P(t) dt, \quad (36)$$

где  $c_{\text{пасс.}}$  — оценка удельных расходов, зависящих от простоя пассажирских поездов, руб./вагоно-ч;

$$E_2^{\text{приг.}} = c_{\text{приг.}} \sum_{i=1}^I \int_{t_i}^{t_{i+1}} P(t) dt, \quad (37)$$

где  $c_{\text{приг.}}$  — оценка удельных расходов, зависящих от простоя пригородных поездов, руб./вагоно-ч;

Длительные перерывы движения из-за последствий транспортного происшествия вызывают необходимость временных изменений не только в технологии работы с грузовыми поездами, но и в работе пассажирского комплекса. Изменение технологии работы регулярных пассажирских перевозок подразумевает:

- отмену пассажирских и пригородных поездов;
- временную задержку пассажирских поездов в ожидании возможности их пропуска;
- временное изменение маршрута следования пассажирских поездов;
- следование пассажирских и пригородных поездов до станций, ограничивающих барьерное место, с организацией перевозки пассажиров между ними автомобильным транспортом.

После высадки пассажиров и выполнения необходимых операций (смена кабины управления в случае с электропоездами, перестановка локомотива с головы в хвост) поезда меняют направление движения и следуют на станцию оборота или на пути отстоя. Таким образом,  $E_3^{\text{пасс.}} = 0$  и  $E_3^{\text{приг.}} = 0$ .

Изменения технологии работы пассажирского комплекса при возникновении транспортных происшествий необходимо учесть также при расчете затрат  $E_4^{\text{пасс.}}$  и  $E_4^{\text{приг.}}$ .

$$E_4^{\text{пасс.}} = E_{\text{пер. изм}}^{\text{пасс.}} + E_{\text{жд. авт.}}, \quad (38)$$

$E_{\text{пер. изм}}^{\text{пасс.}}$  — дополнительные затраты на организацию пропуска пассажирских поездов в обход барьерного места, руб.;

$E_{\text{жд. авт.}}$  — затраты железной дороги на перевозку пассажиров автомобильным транспортом, руб.

Перевозочные затраты на организацию пассажирского движения определяются по формуле:

$$E_{\text{пер.}}^{\text{пасс.}} = C_j x_j, \quad (39)$$

где  $C_j$  — стоимостная оценка поезда  $j$ -го назначения, руб.;

$x_j$  — число поездов  $j$ -го назначения.

Стоимостная оценка поезда назначения  $j$   $C_j$  определяется по формуле:

$$C_j = e_j L_j, \quad (40)$$

где  $e_j$  — затраты, приходящиеся на один километр, руб./км;

$L_j$  — длина маршрута поезда  $j$ -го назначения, км.

Дополнительные расходы, которые возникают при отклонении пассажирского поезда от установленного маршрута, рассчитываются по формуле (41) на основе формул (39) и (40):

$$E_{\text{пер. изм}}^{\text{пасс.}} = (e_{j2} L_{j2} - e_{j1} L_{j1}) * x_j, \quad (41)$$

где  $j_2$  – назначение пассажирского поезда с измененным маршрутом следования, относительно установленного маршрута  $j_1$ .

Пригородный железнодорожный транспорт в ряде стран на большинстве направлений является убыточным и выполняет социально значимую функцию, осуществляя перевозку граждан внутри агломераций. Получение прибыли от перевозок в пригородном сообщении является вторичной задачей, осуществимой на направлениях с большим пассажиропотоком. Расчет экономических потерь от отмены пригородных поездов нецелесообразен, если закладывать в основу расчета лишь стоимости билетов в зависимости от тарифных зон. Для объективной оценки последствий отмены электропоездов в агломерациях необходимо учитывать косвенное влияние данной регулировочной меры на их экономику.

Пригородным поездам зачастую нецелесообразно следовать по протяженным альтернативным путям следования, поскольку для пригородного движения важно осуществлять доставку пассажиров в пределах конкретных зон. Однако в случае наличия возможности организации альтернативного пути следования электропоездов, проходящего через установленные пригородные зоны, регулировочная мера становится целесообразной.

Таким образом, составляющая целевой функции  $E_4^{\text{приг.}}$  может быть получена с помощью формулы:

$$E_4^{\text{приг.}} = E_{\text{пер. изм}}^{\text{приг.}} + E_{\text{жд. авт.}} \quad (42)$$

Расходы ОАО «РЖД» на автомобильный транспорт для перевозки пассажиров (в пассажирском и пригородном сообщениях) определяются установленными тарифами на перевозку по маршруту и рассчитываются по формуле:

$$E_{\text{жд. авт.}} = e_{\text{тар. у}} * L * u, \quad (43)$$

где  $e_{\text{тар. у}}$  – тариф транспортной компании при перевозке выбранным маршрутом транспортным средством у-типа и марки, руб./км;

$L$  – протяженность маршрута, км;

$u$  – количество рейсов определяется в зависимости от количества пассажиров  $x_{ik}$  по формуле:

$$u = \frac{x_{ik}}{q_y}, \quad (44)$$

где  $q_y$  – количество пассажиров, которое может быть перевезено транспортным средством у-типа и марки.

Затраты на содержание восстановительных поездов  $E_5$  выражаются формулой:

$$E_5 = c_3 T_{\text{пер}} VP, \quad (45)$$

где  $c_5$  – приведенные затраты на содержание восстановительного поезда за 1 час работы, руб./час.

При оценке эффективности работы восстановительных поездов рассчитывают годовые затраты на содержание восстановительных поездов  $E_{\text{восст.}}$ . Они определяются по формуле:

$$E_{\text{восст.}} = E_{\text{зп}} + E_{\text{то}} + E_{\text{пр}}, \quad (46)$$

где  $E_{\text{зп}}$  – общие годовые затраты на заработную плату персонала восстановительных поездов, руб./год;

$E_{\text{то}}$  – общие годовые затраты на техническое обслуживание и содержание оборудования и инвентаря восстановительных поездов, руб./год;

$E_{\text{пр}}$  – общие годовые затраты, включающие расходы на электроэнергию, топливо, материалы, руб./год. К этой группе также относятся затраты на амортизацию оборудования.

Таким образом,  $c_5$  рассчитывается по формуле:

$$c_5 = \frac{E_{\text{восст.}}}{365 \cdot 24} \quad (47)$$

**В четвертой главе** диссертационного исследования формулируется алгоритм выбора эффективной схемы размещения восстановительных поездов на направлении. Взаимосвязь количества восстановительных поездов и схемы их размещения на полигоне можно учесть, рассматривая направление железнодорожной сети как неориентированный граф, вершины которого являются техническими, участковыми сортировочными станциями, а ребра – железнодорожными участками между ними. Ребра характеризуются протяженностью и размерами движения. Составляющие целевой функции  $E(VP)$  рассчитываются для всех возможных вариантов размещения восстановительных средств, т.е. для каждой вершины графа.

Алгоритм выбора эффективной схемы размещения восстановительных поездов выглядит следующим образом:

- 1) Полигон железных дорог рассматривается в качестве графа, вершины которого – железнодорожные узлы, ребра – участки определенной протяженности. Также ребра характеризуются размерами движения.
- 2) Производится расчет расстояний вершина – дуга для вершин – восстановительных поездов и ребер графа.
- 3) С использованием расчетов расстояний вершина – дуга производится определение составляющих  $E_1, E_2, E_3, E_4$ . Суммы составляющих, соответствующих каждому ребру и вершине, сводятся в таблицу. Для каждой вершины выбираются ячейки с минимальными значениями сумм составляющих  $E_1, E_2, E_3, E_4$ ,
- 4) Производится выбор вариантов размещения восстановительных поездов. В их зону обслуживания должно входить наибольшее возможное количество ребер, которым соответствуют ячейки с наименьшими суммами составляющих  $E_1, E_2, E_3, E_4$ . Для каждого из вариантов производится добавление составляющей  $E_5$ , расчет целевой функции  $E(VP)$ , сравнение вариантов. По результатам сравнения выбирается вариант с наименьшим значением целевой функции  $E(VP)$ .
- 5) Увеличивается количество восстановительных поездов до тех пор, пока в их зоны обслуживания не войдут все ячейки с минимальными значениями сумм составляющих  $E_1, E_2, E_3, E_4$ . Происходит последовательное увеличение количества восстановительных поездов с

уменьшением затрат; при этом количество вариантов из доступного множества снижается.

Алгоритм требует различного подхода к разветвленным и неразветвленным полигонам. Если полигон является смешанным (состоит из разветвленной и неразветвленной частей), то он должен быть разделен на соответствующие части, к каждой из которой отдельно применяется алгоритм. Далее, на основе полученных результатов для каждой из частей, производится подбор эффективной схемы размещения восстановительных поездов на смешанном полигоне в целом.

Разработанный алгоритм применен на экспериментальных направлениях различной конфигурации, а также на Юго-Восточной, Забайкальской и Октябрьской железных дорогах.

В результате выполненных расчетов было установлено, что для Юго-Восточной дороги оптимальным является размещение 9 восстановительных поездов, для Забайкальской железной дороги – 10 восстановительных поездов, а для Октябрьской железной дороги – 15 восстановительных поездов.

Исследована возможность применения методики выбора эффективной схемы размещения восстановительных поездов в случае перспективных инфраструктурных и технологических изменений, с модификацией алгоритма, учитывающей рост планируемых размеров движения; увеличение пропускных и провозных способностей по участкам и станциям; изменение схемы тягового обслуживания; уменьшение размеров движения поездов определенного вида с переводом поездов на специализированную линию. Постепенное развитие системы восстановительных поездов должно быть последовательным, при этом должны исключаться варианты с ликвидацией ранее предложенных восстановительных поездов. Итерации алгоритма, на которых предлагается размещение восстановительных поездов, подлежащих удалению в перспективе, должны пропускаться.

## Заключение

В диссертационном исследовании:

1. Сформулирована теоретическая модель системной динамики развития поездной ситуации, включающая в себя четыре периода изменения эксплуатационной обстановки: с момента транспортного происшествия до момента прибытия восстановительного поезда; с момента прибытия восстановительного поезда до момента частичного восстановления пропускной способности для возобновления движения поездов; с момента частичного восстановления пропускной способности до момента восстановления исходных инфраструктурных возможностей; с момента восстановления перевозочных мощностей до момента нормализации поездной обстановки с учетом инерционности накопления единиц транспортного потока на путях станций.

2. В результате анализа случаев нарушения безопасности движения на полигонах сети железных дорог ОАО «РЖД» выявлена инерционность процесса

накопления поездов на полигоне после восстановления первоначальных перевозочных мощностей, связанная с перераспределением тяговых ресурсов под отставленные от движения поезда.

3. Предложена технология имитационных расчетов по выбору эффективных способов организации движения при возникновении транспортных происшествий и в период производства восстановительных работ, предусматривающая классификацию полигонных и крупномасштабных регулировочных мер, предпринимаемых оперативно-диспетчерским персоналом для снижения темпов усугубления поездной ситуации после возникновения транспортного происшествия и уменьшения времени возвращения системы к исходному состоянию.

4. Обоснованы критерии экономической эффективности схемы размещения восстановительных поездов, структура и порядок вычисления натуральных и стоимостных показателей, инфраструктурных и ресурсных ограничений, учитываемых при организации перевозочного процесса после возникновения барьерного места и в процессе восстановления движения.

5. Предложена сетевая математическая модель, и разработан эвристический алгоритм выбора вариантов размещения восстановительных поездов и зон их обслуживания на железнодорожных полигонах, в процессе работы которого последовательно увеличивается количество восстановительных поездов с уменьшением значения целевой функции затрат; при этом количество вариантов из доступного множества снижается. Исследована модификация алгоритма, обеспечивающая выбор эффективной схемы размещения восстановительных поездов в случае перспективных инфраструктурных и технологических изменений на полигоне железнодорожной сети.

### **Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:**

#### *В рецензируемых научных изданиях:*

1. Сухов, А.А. Имитационное исследование динамики развития и устранения барьерных мест в задаче размещения восстановительных средств железных дорог / А.А. Сухов // Транспорт Урала. – 2021. - №1 (68). – С. 103-107.

2. Дмитриев, Е.О. Тяговое обеспечение поездной работы при изменениях эксплуатационной обстановки / Е.О. Дмитриев, А.А. Сухов, А.С. Петров, Е.А. Алексеев // Вестник транспорта Поволжья. – 2021. – №2 (86). – С. 58-66.

#### *В других изданиях:*

3. Borodin, A.F. Providing the functional reliability of the transport process in placing recovery trains / A.F. Borodin, A.A. Sukhov // Proceedings of 2018' 11th international conference "Management of Large-scale system development", MLS D 2018 – 2018. – С. 855-938.

4. Sukhov, A.A. Evaluating recovery facilities placement options in railway network nodes / A.A. Sukhov // Proceedings of 2019' 12th international conference

“Management of Large-scale system development”, MLSD 2019 – 2019. – С. 8911068.

5. Сухов, А.А. Математическое моделирование схемы размещения восстановительных поездов на железных дорогах / А.А. Сухов // Безопасность движения поездов, Москва, 16-17 ноября 2017 года : Сборник трудов 18-й научно-практической конференции – М.: РУТ(МИИТ). – 2017. – С. VIII-35 – VIII-36.

6. Бородин, А.Ф. Обеспечение функциональной надежности перевозочного процесса при размещении восстановительных средств железных дорог / А.Ф. Бородин, А.А. Сухов // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2018), Москва, 1–3 октября 2018 года : Материалы одиннадцатой международной конференции // Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – М.: Международный научно-исследовательский институт проблем управления РАН. – 2018. – С. 44-46.

7. Сухов, А.А. Размещения восстановительных средств в узлах железнодорожной сети / А.А. Сухов // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2019), Москва, 1–3 октября 2019 года : Материалы двенадцатой международной конференции // Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – М.: Международный научно-исследовательский институт проблем управления РАН. – 2019. – С. 720-722.

8. Бородин, А.Ф. Методы оценки показателей надежности в прикладных задачах управления перевозочным процессом / А.Ф. Бородин, К.Ю. Николаев, А.А. Сухов // Восьмая научно-техническая конференция «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование», Москва, 21 ноября 2019 г. : Сборник трудов // под ред.: Матюхин В.Г., Строгонов В.И. – Москва : АО "НИИАС". – 2019. – С. 110-114.

9. Сухов, А.А. Размещение восстановительных поездов на разветвленных полигонах / А.А. Сухов // Проблемы безопасности на транспорте, Гомель, 26-27 ноября 2020 года : Материалы десятой Международной научно-практической конференции // Отв. ред. Ю.И. Кулаженко – Гомель: БелГУТ. – 2020. – С. 62–64.

10. Сухов, А.А. Критерии выбора рациональной схемы размещения восстановительных средств / А.А. Сухов // Тихомировские чтения. Синергия технологии перевозочного процесса», Гомель, 10-11 декабря 2020 года : Материалы Международной научно-практической конференции // Отв. ред. А.А. Ерофеев – Гомель: БелГУТ. – 2021. – С. 363–365.

11. Сухов, А.А. Оценка влияния регулировочных мероприятий дежурно-диспетчерского персонала на развитие эксплуатационной обстановки после образования барьерного места / А.А. Сухов // Фёдор Петрович Кочнев – выдающийся организатор транспортного образования и науки в России, Москва, 22-23 апреля 2021 года : Труды Международной научно-практической конференции // Отв. ред. А.Ф. Бородин – М.: РУТ(МИИТ). – 2021. – С. 157–161.

Основные положения и результаты исследований самостоятельно получены автором. Статьи [1, 4, 5, 7, 9, 10, 11] подготовлены единолично.

Личный вклад автора диссертации в рамках публикаций [2, 3, 6, 8], подготовленных в соавторстве: динамика эксплуатационных затруднений с изменением перевозочной мощности, наличия единиц транспортных потоков и среднесуточных расходов, связанных с их организацией и продвижением [3, 6], применение понятия надежности перевозочного процесса в задаче размещения восстановительных поездов [8], причины и следствия инерционности накопления единиц транспортного потока на структурном подразделении железнодорожной сети после восстановления движения на направлении [2].

**Сухов Андрей Александрович**

**РАЦИОНАЛЬНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ  
РАЗМЕЩЕНИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

2.9.4 – Управление процессами перевозок (технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать 25 марта 2022 г.

Формат 60x84 1/16  
Тираж 100 экз.

Объем усл. печ. л. 1,4  
Заказ 14

УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66